



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Simulación numérica del proceso de sedimentación en
el desarenador de la central hidroeléctrica Cañón del
Pato**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Gino Huber RAMOS ORELLANA

ASESOR

José Feliciano JUÁREZ CÉSPEDES

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ramos, G. (2019). *Simulación numérica del proceso de sedimentación en el desarenador de la central hidroeléctrica Cañón del Pato*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código Orcid del autor (dato opcional): No cuenta con código Orcid.

Código Orcid del asesor o asesores (dato obligatorio): No cuenta con código Orcid.

DNI del autor: 47358082.

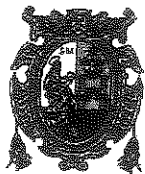
Grupo de investigación: Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos e Hidráulica – CEDIT.

Institución que financia parcial o totalmente la investigación: ninguna institución, los fondos fueron propios.

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación. Debe incluir localidades y coordenadas geográficas

Lugar y ciudad	Coordenadas UTM	
	Norte (m)	Este (m)
Central Hidroeléctrica Cañón del Pato (Huaylas, Ancash)	185838.67	9024482.01
EAP. Mecánica de Fluidos (Cercado de Lima, Lima)	272785.41	8666289.03
Domicilio (SMP, Lima)	271523.95	8674742.35

Año o rango de años que la investigación abarcó: desde agosto del 2016 hasta noviembre del 2018.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS
MODALIDAD (M-1)**

Siendo las 18:00 horas del miércoles 27 de marzo de 2019, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y con la asistencia del asesor Ing. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ CÉSPEDES, y miembros Ing. REUTER ARTURO ALIAGA DÍAZ e Ing. MARIO ALBERTO GARCÍA PÉREZ de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

GINO HUBER RAMOS ORELLANA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller GINO HUBER RAMOS ORELLANA a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN EN EL DESARENADOR DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

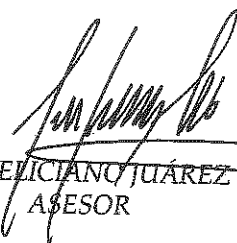
Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

Dieciseis 16

El Presidente del Jurado Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller GINO HUBER RAMOS ORELLANA, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 20:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.


Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
PRESIDENTE


Ing. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ CÉSPEDES
ASESOR


Ing. REUTER ARTURO ALIAGA DÍAZ
MIEMBRO


Ing. MARIO ALBERTO GARCÍA PÉREZ
MIEMBRO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la sabiduría, por protegerme y siempre guiarme por el sendero de la vida y las buenas prácticas.

A mis padres, Juan y Belinda, por su sacrificio, por sus enseñanzas y valores inculcados.

A mis hermanas, Denisse y Lorena, por su aliento en el proceso de formación y culminación del presente trabajo.

A toda mi familia, que indirectamente me brindaron fuerzas para poder realizar uno de mis objetivos y alcanzar mis metas.

Al mi asesor, Ing. José Juárez Céspedes, por sus enseñanzas en los cursos de Hidráulica y Centrales Hidroeléctricas, que son cimientos claves para comprender la aplicación de la ingeniería Mecánica de Fluidos.

Al Ing. Miguel Ángel Ormeño Valeriano, por su guía en la materia de la Dinámica de Fluidos Computacional que es pieza fundamental en el presente trabajo.

A los ingenieros, personal técnico y amigos, que me brindaron su amistad y todo su apoyo cuando realizaba mis prácticas profesionales en la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

A todos los ingenieros de la EAP Ingeniería Mecánica de Fluidos, que me brindaron sus conocimientos en los diferentes cursos en mi etapa universitaria.

Amistades en general, por su apoyo desinteresado.

DEDICATORIA

A Dios, todopoderoso

A mis padres, Juan y Belinda

A mis hermanas, Denisse y Lorena

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el proceso de sedimentación en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, con la finalidad de mejorar el proceso de sedimentación en el desarenador. Para ello se ha realizado la simulación numérica del desarenador con la tabiquería en las naves centrales y laterales (Escenario 1) y como propuesta de mejora, sin la tabiquería en las naves (Escenario 2), con la finalidad de mejorar el proceso de sedimentación en el desarenador. Para la simulación numérica de ambos escenarios se ha utilizado el módulo CFX del software Ansys, que se basa en las ecuaciones gobernantes de flujos de Navier-Stokes, las cuales son resueltas por el método de volúmenes finitos. Además, se ha implementado el modelo k-epsilon; como modelos multifásicos, el modelo Euleriano para determinar la superficie libre y el modelo Lagrangiano para el transporte de partículas. Los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica, fueron validados con estudios anteriores realizados en la central hidroeléctrica, como el Estudio de Transporte de Sedimentos elaborado por ELECTROPERU en 1985, e información recopilada del centro de control de la Bocatoma y Casa Fuerza de la central hidroeléctrica. De los resultados obtenidos de la simulación hidrodinámica, se concluye que en el Escenario 2, las naves centrales adquieren mayor velocidad con respecto al Escenario 1, además para las naves laterales presentan una mínima variación con respecto al incremento del caudal de ingreso al desarenador que son direccionados hacia las naves centrales debido a la pequeña transición que no distribuye uniformemente el flujo en todas las naves. De la simulación de transporte de sedimentos del Escenario 2, se determinó la eficiencia del desarenador en función de la concentración en la entrada y salida de la estructura del desarenador, para el caudal de operación actual de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ se determinó que el 7,38% de los sólidos en suspensión que ingresan al sistema del desarenador son retenidos por la estructura.

Palabras claves: desarenador, simulación numérica, sedimentos, Ansys CFX.

ABSTRACT

The present work deals with the sedimentation process in the desander of the Cañón del Pato Hydroelectric Plant, in order to improve the sedimentation process in the sand trap. For this, the numerical simulation of the sand trap with the partition walls in the central and lateral naves has been carried out (Scenario 1) and as an improvement proposal, without the partition walls in the ships (Scenario 2), in order to improve the sedimentation process in the sand trap. For the numerical simulation of both scenarios, the CFX module of the Ansys software was used, which is based on the Navier-Stokes flow governing equations, which are solved by the finite volume method. In addition, the k-epsilon model has been implemented; as multiphase models, the Eulerian model to determine the free surface and the Lagrangian model for the transport of particles. The results obtained from the numerical simulation were validated with previous studies carried out at the hydroelectric power station, such as the Sediment Transport Study prepared by ELECTROPERU in 1985, and information gathered from the control center of the Bocatoma and Casa Fuerza of the power plant hydroelectric. From the results obtained from the hydrodynamic simulation, it is concluded that in Scenario 2, the central naves acquire greater speed with respect to Scenario 1, in addition for the lateral naves they present a minimum variation with respect to the increase of the inflow to the desander that are directed towards the central ships due to the small transition that does not evenly distribute the flow in all the ships. From the simulation of sediment transport in Scenario 2, the efficiency of the desander was determined according to the concentration at the inlet and outlet of the structure of the desander, for the current operating flow rate of $80 \text{ m}^3/\text{s}$ it was determined that the 7, 38% of the solids in suspension that enter the system of the sand trap are retained by the structure.

Keywords: desander, numerical simulation, sediments, Ansys CFX.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	V
INDICE GENERAL	VI
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
2. CENTRAL HIDROELECTRICA CAÑÓN DE PATO	3
2.1. Breve reseña histórica	3
2.2. Antecedentes	4
2.3. Ubicación	7
2.4. Características generales de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	8
3. DESCRIPCION DE LA CUENCA DEL RIO SANTA	15
3.1. Generalidades	15
3.2. Diagrama topológico de la cuenca.....	18
3.3. Reservorios de regulación en la cuenca	19
3.4. Características hidrológicas del río Santa en el sitio de aprovechamiento de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	21
4. DESARENADORES	25
4.1. Introducción al estudio de desarenadores en centrales hidroeléctricas	25
4.1.1. Criterios generales.....	25
4.1.2. Componentes y zonas de un desarenador	26
4.1.3. Tipos de desarenadores.....	27
4.1.4. Dimensionamiento	28
4.2. Diseño hidráulico de la estructura de un desarenador	28

4.2.1. Diseño hidráulico de la estructura de entrada.....	29
4.2.2. Diseño hidráulico de la cámara de desarenación	31
4.2.3. Diseño hidráulico de las estructuras de limpieza	42
4.3. El desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	43
4.3.1. Factores que causan la variación de la orientación del flujo en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	45
4.3.2. Problemas de decantación de sólidos en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	46
5. CARACTERISTICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RIO SANTA .	48
5.1. Tamaño de sedimentos.....	48
5.2. Composición mineralógica	50
5.3. Forma de sedimentos	51
5.4. Concentración de sólidos	52
5.5. Transporte de sedimentos en la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	52
5.5.1. Transporte de sedimentos	52
5.5.2. Granulometría de los sedimentos.....	55
5.5.3. Análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión y por arrastre de fondo transportados por el río Santa	58
5.5.4. Velocidad de sedimentación y gravedad específica	59
5.5.5. Análisis mineralógico.....	60
6. METODOLOGIA	61
6.1. Dinámica de fluidos computacional	61
6.2. Modelo numérico.....	63
6.2.1. Generalidades.....	63
6.2.2. Ecuaciones gobernantes.....	64

6.2.3. Modelo de turbulencia	67
6.2.4. Modelos multifásicos	70
6.2.5. Modelo de transporte de sedimentos	76
6.3. Escenarios a simular	77
6.4. Simulación hidrodinámica	79
6.4.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente	79
6.4.2. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería	94
6.5. Simulación de transporte de sedimentos	99
6.5.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería	99
7. RESULTADOS	115
7.1. Análisis del patrón de flujo	115
7.1.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería existente	115
7.1.2. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería	141
7.2. Concentraciones en secciones de interés	161
7.2.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería	161
8. CONCLUSIONES	171
9. RECOMENDACIONES	173
10. BIBLIOGRAFIA	174

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1: Embalses de regulación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	19
Cuadro 3.2: Estaciones meteorológicas de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	22
Cuadro 3.3: Estaciones hidrométricas de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	22
Cuadro 6.1: Discretización en función del tamaño del elemento – Nave Central	82
Cuadro 6.2: Discretización en función del tamaño del elemento – Nave Lateral.....	82
Cuadro 6.3: Valores y parámetros del dominio	84
Cuadro 6.4: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$..	86
Cuadro 6.5: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$..	86
Cuadro 6.6: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$..	86
Cuadro 6.7: Valores y parámetros para la condición de entrada.....	87
Cuadro 6.8: Valores y parámetros para la condición de salida	88
Cuadro 6.9: Valores y parámetros para la condición de apertura hacia la atmósfera	88
Cuadro 6.10: Valores y parámetros para la condición de pared	88
Cuadro 6.11: Valores y parámetros para las condiciones de partida	89
Cuadro 6.12: Calibración del dominio discretizado en función de la velocidad media de la nave central.....	93
Cuadro 6.13: Calibración del dominio discretizado en función de la velocidad media de la nave lateral.....	94
Cuadro 6.14: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal $48 \text{ m}^3/\text{s}$	103
Cuadro 6.15: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal $72 \text{ m}^3/\text{s}$	103
Cuadro 6.16: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal $80 \text{ m}^3/\text{s}$	103

Cuadro 6.17: Detalles del material insertado – Partícula de sedimento	104
Cuadro 6.18: Cálculo estadístico del análisis mecánico por tamizado de solidos de suspensión de la entrada del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato....	105
Cuadro 6.19: Valores y parámetros del dominio.	107
Cuadro 6.20: Promedio mensual de caudal que es captado en la bocatoma y concentración media medidos en la bocatoma y Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, periodo 2005-2016.....	108
Cuadro 6.21: Valores y parámetros para la condición de entrada.....	110
Cuadro 6.22: Calibración del dominio discretizado en función de la concentración media en la sección transversal de la entrada y salida del desareandor sin tabiquería.	114
Cuadro 7.1: Velocidad media en la sección transversal en la entrada y salida del desarenador con tabiquería para diferentes caudales de ingreso.....	115
Cuadro 7.2: Velocidad media en la sección transversal en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería para diferentes caudales de ingreso.....	141
Cuadro 7.3: Concentraciones medias en la sección transversal de entrada y salida del desarenador sin tabiquería para los diferentes caudales de ingreso.....	161

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Caudales medios mensuales históricos (La Balsa + Los Cedros) (m^3/s) disponibles en la Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Periodo 1954-2013	23
Tabla 3.2: Caudales medios mensuales naturales (La Balsa + Los Cedros) (m^3/s) disponibles en la Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Periodo 1954 - 2013	24
Tabla 4.1: Diámetro de partícula que un desarenador puede retener en función de la altura de caída de la central hidroeléctrica	29
Tabla 4.2: Diámetro de partícula a eliminar en función del tipo de turbina	29
Tabla 4.3: Tamaño mínimo del material a ser retenido en el desarenador	31
Tabla 4.4: Valores de “a” en función del diámetro	33
Tabla 4.5: Velocidad de sedimentación w calculado por Arkhangelski (1985) en función del diámetro de partícula.....	34
Tabla 4.6: Constante k para la fórmula de Owens	34
Tabla 4.7: Constante k para el cálculo de desarenadores de baja velocidad.....	41
Tabla 4.8: Constante k para el cálculo de desarenadores de alta velocidad.....	41
Tabla 5.1: Serie de tamices Tyler Estándar y US Bureau of Standards.....	49
Tabla 5.2: Escala de graduación de sedimentos, American Geophysical Union Agua (1947)	50
Tabla 5.3: Caudales medios (m^3/s) medidos en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	54
Tabla 5.4: Caudales medios (m^3/s) medidos en Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	54
Tabla 5.5: Concentración media (gr/l) de los caudales captados en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	54

Tabla 5.6: Concentración media (gr/l) medidos en Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	55
--	----

Tabla 5.7: Análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión y por arrastre de fondo transportados por el río Santa – Periodo: Avenida, 1985.....	59
--	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema representativo del sistema bocatoma (Principal y Complementaria) – desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	11
Figura 2.2: Esquema Hidráulico General de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	14
Figura 3.1: Infraestructura Hidráulica en Operación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	18
Figura 4.1: Desarenador, zonas que lo conforman	26
Figura 4.2: Componentes generales de un desarenador.....	27
Figura 4.3: Vista en planta de una transición	30
Figura 4.4: Diferencia de alturas entre espejos de agua	30
Figura 4.5: Esquema de la curvatura de un grano de arena “k”, depositándose bajo la influencia de la turbulencia	32
Figura 4.6: Dimensionamiento y elevación de la cámara desarenadora.....	38
Figura 4.7: Vista isométrica de un elemento tabicado del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	44
Figura 6.1: Volumen de control.	65
Figura 6.2: Flujos multifásicos.....	71
Figura 6.3: Interfase de superficie libre.	75
Figura 6.4: Diseño del proceso de simulación.	78
Figura 6.5: Vista isométrica de la geometría del desarenador – Nave central tabicada	80
Figura 6.6: Vista isométrica de la geometría del desarenador – Nave lateral tabicada	81
Figura 6.7: Discretización del desarenador con la tabiquería en la nave central de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	82

Figura 6.8: Discretización del desarenador con la tabiquería en la nave lateral de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	83
Figura 6.9: Dimensiones del canal de acceso al desarenador	85
Figura 6.10: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y volumen con respecto a las iteraciones.....	90
Figura 6.11: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones.....	91
Figura 6.12: Valores residuales de fracción de volumen con respecto al número de iteraciones.....	91
Figura 6.13: Discretización del desarenador sin tabiquería en las naves de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	95
Figura 6.14: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y volumen con respecto a las iteraciones	98
Figura 6.15: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones.....	98
Figura 6.16: Valores residuales de fracción de volumen con respecto al número de iteraciones.....	99
Figura 6.17: Geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquería en las naves	100
Figura 6.18: Plano XY en el eje Z que corta la superficie libre en la estructura simulada	101
Figura 6.19: Ubicación del plano YZ en el eje X en la cresta del vertedero	101
Figura 6.20: Geometría del desarenador a utilizar para la simulación de transporte de sedimentos para un caudal de 48 m ³ /s	102
Figura 6.21: Discretización de la geometría del desarenador para la simulación de transporte de sedimentos para un caudal de 48 m ³ /s.....	104

Figura 6.22: Valores y parámetros para la condiciones de partida.....	110
Figura 6.23: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y masa con respecto a las iteraciones.	111
Figura 6.24: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones.....	112
Figura 7.1: Superficie libre del desarenador con tabiquerías para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$	117
Figura 7.2: Superficie libre del desarenador con tabiquería para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$	117
Figura 7.3: Superficie libre del desarenador con tabiquería para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$	118
Figura 7.4: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	119
Figura 7.5: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	119
Figura 7.6: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	120
Figura 7.7: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	120
Figura 7.8: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	121
Figura 7.9: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	121
Figura 7.10: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	123
Figura 7.11: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	123
Figura 7.12: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	124

Figura 7.13: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	124
Figura 7.14: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	125
Figura 7.15: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	125
Figura 7.16: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	126
Figura 7.17: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	127
Figura 7.18: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	127
Figura 7.19: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	128
Figura 7.20: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	128
Figura 7.21: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	129
Figura 7.22: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	130
Figura 7.23: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	131
Figura 7.24: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	131
Figura 7.25: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	132

Figura 7.26: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	132
Figura 7.27: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.....	133
Figura 7.28: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal.....	134
Figura 7.29: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal.....	134
Figura 7.30: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	135
Figura 7.31: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	135
Figura 7.32: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	136
Figura 7.33: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	136
Figura 7.34: Contorno de velocidad del desareandor con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	138
Figura 7.35: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	138
Figura 7.36: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	139
Figura 7.37: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	139
Figura 7.38: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	140

Figura 7.39: Contorno de velocidad de desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	140
Figura 7.40: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$	143
Figura 7.41: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$	143
Figura 7.42: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$	144
Figura 7.43: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	145
Figura 7.44: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	145
Figura 7.45: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	146
Figura 7.46: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	147
Figura 7.47: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	147
Figura 7.48: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador, sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	148
Figura 7.49: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	148
Figura 7.50: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	149
Figura 7.51: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	149
Figura 7.52: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	150

Figura 7.53: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	151
Figura 7.54: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	151
Figura 7.55: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	152
Figura 7.56: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	152
Figura 7.57: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	153
Figura 7.58: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	154
Figura 7.59: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	154
Figura 7.60: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	155
Figura 7.61: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	156
Figura 7.62: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	156
Figura 7.63: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	157
Figura 7.64: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	157
Figura 7.65: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	158

Figura 7.66: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	158
Figura 7.67: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	159
Figura 7.68: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	160
Figura 7.69: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal.....	160
Figura 7.70: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	163
Figura 7.71: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.	163
Figura 7.72: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta	164
Figura 7.73: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	164
Figura 7.74: Transporte de sedimento en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	165
Figura 7.75: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	165
Figura 7.76: Transporte de sedimentos en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal.....	166
Figura 7.77: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal	166
Figura 7.78: Transporte de sedimentos en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal.....	167

Figura 7.79: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	168
Figura 7.80: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	168
Figura 7.81: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	169
Figura 7.82: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	169
Figura 7.83: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	170
Figura 7.84: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal	170

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1: Velocidad de sedimentación de granos de arena en agua turbia según Sudry	35
Gráfica 4.2: Experiencia de Selerio	36
Gráfica 4.3: Tiempo de caída de gramos según experiencia de Bosterli	37
Gráfica 5.1: Curva granulométrica de sólidos en suspensión en zonas de interés.	59
Gráfica 6.1: Distribución de la velocidad en las naves en función del gasto total que ingresa al desarenador (1985).....	92
Gráfica 6.2: Relación del caudal captado y concentración media en la Bocatoma y Casa Fuerza.	109

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1: Bocatoma Principal (Antigua).....	9
Fotografía 2.2: Bocatoma Complementaria (Nueva)	10
Fotografía 3.1: Reservorio de regulación diaria San Diego – R2 (captación)	20
Fotografía 4.1: Desarenador de la Central Hidroeléctrica El Platanal (Yauyos – Perú), tiene un caudal de ingreso de 20 m ³ /s y 5 cámaras desarenadoras	37
Fotografía 4.2: Ingreso a las naves del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	47
Fotografía 5.1: Sedimentos acumulados en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.....	60

1. INTRODUCCION

En los últimos cinco años, en el Perú la demanda de energía eléctrica ha aumentado en promedio anual de 8% debido a las actividades de minería y manufactura, esta tendencia de crecimiento sigue en la actualidad por lo que las centrales hidroeléctricas se ven en la necesidad de aumentar su producción energética.

Debido al aumento de la demanda energética, la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato se vio obligada a complementar las estructuras hidráulicas con una bocatoma nueva o complementaria, para captar la mayor cantidad de recursos hídricos, que pueda abastecer la demanda de energía eléctrica, pero es probable que no tomaran en cuenta las dimensiones del desarenador y los sólidos de suspensión que son transportados por el río Santa.

La Central Hidroeléctrica Cañón del Pato cuenta con un taller de maestranza propio, donde se realizan las reparaciones de las ruedas Pelton que son dañadas por el comportamiento abrasivo de los sólidos en suspensión que deja pasar el desarenador de la central hidroeléctrica.

Un problema que aqueja desde sus inicios hasta la actualidad a la central hidroeléctrica es el transporte de sólidos. El río Santa en las épocas de avenida transporta una considerable cantidad de sedimentos, que provoca en las estructuras de captación obtener un caudal menor al requerido. Las rejillas impiden el paso de los sólidos, provocando captar un caudal menor al requerido, además en el desarenador se presenta pérdidas de caudal, debido al mal funcionamiento de las válvulas de purgas y a los problemas sedimentológicos.

Por las causas descritas, la central hidroeléctrica produce una potencia instalada menor a la diseñada, produciendo pérdidas de potencia y menor generación hidráulica¹.

La presente investigación se justifica en la necesidad de analizar, cuantificar e interpretar el patrón de flujo y el transporte de sedimentos en suspensión en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente y sin las tabiquerías, con ello se pretende que se tomen en cuenta estos comportamientos dentro de la estructura para una posible mejora del diseño hidráulico del desarenador de la central hidroeléctrica.

¹ (Díaz, 1991)

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Efectuar la simulación numérica del proceso de sedimentación en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato utilizando el software Ansys CFX.

1.1.2. Objetivos específicos

- Simular la situación actual del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, empleando el software Ansys CFX.
- Simular la situación del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería que existe actualmente, empleando el software Ansys CFX.

2. CENTRAL HIDROELECTRICA CAÑÓN DE PATO

2.1. Breve reseña histórica

Antúnez de Mayolo llegado al Perú, comienza a recorrer el territorio peruano con el objetivo de tener un mayor conocimiento acerca de los recursos hídricos y mineros, de las cuales centró mayor importancia en el potencial energético del río Santa².

Empezó a estudiar la posibilidad de una caída de agua en la región de Ancash para la producción de energía eléctrica que serviría para la fabricación de un poderoso fertilizante químico denominado cianamida cálcica (CaCN_2) de 20% de Ley de Azoe.

También estudió otras aplicaciones industriales, entre las cuales destaca una siderúrgica que más tarde sería la siderúrgica de Chimbote.

El estudio comprendió en escoger el lugar más adecuado para la caída de agua, así como también realizar el estudio de factibilidad que incluyen aspectos y cálculos financieros. El lugar escogido, fue el sitio denominado Cañón del Pato, abarcando los estudios hasta 1915. Ese mismo año redactó su informe denominado “Proyecto de Instalación Hidro-Eléctrico-Químico del Cañón del Pato sobre el río Santa, Perú”³.

Con el proyecto y los cálculos terminados, visitó al presidente Billinghurst para proponerle la construcción de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, por lo que fue rechazado por el Ministerio de Fomento, luego se dedicó a trabajar en diversas empresas eléctricas y mineras obteniendo altos cargos⁴.

En 1913 formó la “Compañía Hidroeléctrica del Cañón del Pato” para llevar a cabo su ansiado proyecto, pero se disuelve debido a la Primera Guerra Mundial por falta de recursos financieros.

Antúnez trata de llamar la atención de los entes estatales y privados para que se interesen en ejecutar su proyecto, detenido por carencia de medios económicos. En el año 1940 durante el gobierno de Manuel Prado Ugarteche, debido a la necesidad

² (Valles, 2014)

³ (Díaz, 1991)

⁴ (Valles, 2014)

de energía eléctrica se da mayor atención al proyecto por lo cual se decretó su construcción⁵.

El 4 de junio de 1945 se creó la “Corporación Peruana del Santa” la cual se hizo cargo del proyecto. Antúnez se aleja del proyecto debido a que se le encomienda otros trabajos del rubro energético.

La corporación pasa por altibajos debido a la falta de recursos económicos, logrando en 1955 la financiación para las obras de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato y la Planta Siderúrgica de Chimbote, de esta última obra también se hizo cargo.

Se conforma la sociedad SOGESA (Sociedad de Gestión S.A.) conformado por tres grupos franceses: “Grupo Francés Siderúrgico”, “Grupo Francés Hidro” y el “Banque de Paris et des Pays bas”, con el consorcio de ingenieros contratistas generales peruanos y con la Corporación Peruana del Santa. Pudiendo culminar la ejecución del proyecto⁶.

El 6 de enero de 1958, durante el segundo gobierno de Manuel Prado Ugarteche, fue inaugurada la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, junto al abastecimiento de electricidad, además se dio el riego de grandes áreas de cultivo y a la producción de hierro y acero en Chimbote. Cabe resaltar que el día de la inauguración no se invitó a Santiago Antúnez de Mayolo, ni mucho menos se colocó su nombre en la placa de la obra⁷.

2.2. Antecedentes

La Central Hidroeléctrica Cañón del Pato fue diseñada para poder incrementar su capacidad instalada, esto se debe a que el río Santa presenta en el lugar de captación caudales mayores al de diseño, durante gran parte del año⁸.

En el año 1940, empieza la primera etapa de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato con una potencia instalada de 150 MW, además se forma la Corporación Peruana del Santa.

⁵ (Montesinos, 1997)

⁶ (Díaz, 1991)

⁷ (Montesinos, 1997)

⁸ (Díaz, 1991)

En abril de 1958, es puesta en servicio la primera etapa con dos turbinas de fabricación norteamericana, Pelton Weej Company de 4 200 HP y dos generadores Westinghouse de 25 MW cada uno.

En setiembre de 1967, entra en servicio la segunda etapa con dos grupos generadores de fabricación norteamericana con características similares a la primera de 25 MW cada uno. El mismo año la Corporación Peruana del Santa le encarga al Laboratorio Nacional de Hidráulica el estudio de modelo hidráulico reducido de la *“Distribución de Flujos en el Desarenador de la Central”*. El motivo del estudio fue que le desarenador en condiciones normales de trabajo presentaba deficiencias en su funcionamiento, se observaba que en las naves centrales las velocidades del flujo eran más intensas que en las naves laterales; además en estas últimas se registraban velocidades nulas y, en algunos casos, hasta flujos regresivos. El modelo fue construido a escala 1/50, donde permitió buscar una solución adecuada para estos fenómenos de modo que las velocidades en las cuatro naves del desarenador sean iguales para los caudales de operación.

En 1970, los fenómenos sísmicos ocurridos en el departamento de Ancash y el consecuente aluvión de Yungay ocasionaron daños considerables a las estructuras de captación y desarenación de la central hidroeléctrica, motivando la paralización total de sus servicios durante varios meses.

En 1971 entra en servicio tres grupos Turbo Gas en Chimbote, fabricado por el General Electric de 25 MW cada uno. Al año siguiente entra en servicio un cuarto grupo Turbo Gas de las mismas características que la anterior⁹.

En 1974 la Comisión de Reconstrucción y Rehabilitación de la Zona Afectada por el sismo (CRYRZA) encomienda al Laboratorio Nacional de Hidráulica la ejecución de estudios de modelo hidráulico del funcionamiento de la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, donde se plantearon los siguientes objetivos, como determinar la capacidad de captación de la bocatoma para diferentes caudales, como también estudiar los problemas de sedimentación, acarreo de materiales y erosión sobre la represa y la bocatoma. Una de las conclusiones del estudio del modelo reducido fue: *“Con caudales de estiaje en el río Santa, se llegaría a captar los*

⁹ (Electroperu S.A., 1985)

primeros 48 m³/s, requeridos para alcanzar la potencia de diseño de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Con el caudal de 52 m³/s, se captaría 51 m³/s, estos valores corresponderían a condiciones óptimas de funcionamiento de la bocatoma después de la operación de limpia, es decir sin tener en cuenta las reducciones de la sección del túnel que pudieron reducirse a consecuencia de cualquier acumulación de sedimentos en el túnel de conducción entre la bocatoma y el desarenador y considerando que los niveles de agua en esta última estructura sean tales que el escurrimiento en el túnel de conducción se realice a superficie libre”.

En julio de 1981, se concluye la instalación de la tercera etapa con dos nuevos grupos generadores de fabricación europea, Ganz Electri, de 25 MW cada una y las turbinas Ganz Mavag de 4 200 HP.

En diciembre del año 1985 se realizó el estudio denominado “*Estudio de transporte de sedimentos, Sistema Bocatoma – Desarenador – Turbinas, Central Hidroeléctrica Cañón del Pato*” con los auspicios de la Gerencia de Operaciones de HIDRANDINA S.A. y la Sub – Gerencia de Estudios Especiales – Unidad de Proyectos Río Santa de ELECTROPERU S.A., ejecutado por la Dirección de Investigación de la universidad Ricardo Palma. Este estudio realizó campañas de muestreo de sólidos en suspensión en la época de avenidas para ampliar la información existente y así poder determinar la eficiencia real del desarenador, y en una de sus conclusiones afirma: “*La distribución de velocidades del agua en las naves no es uniforme. Las velocidades en las naves centrales son mayores que en las naves laterales, esto se debe a que las naves laterales por su curvatura ofrecen mayor resistencia al flujo que las naves centrales; además, la transición pequeña y el pronunciado ensanchamiento antes de las naves del desarenador generan turbulencia y vorticidad, cuyo efecto impide la distribución uniforme de la corriente*”.

En 1987, la Cía. Hidroservice Engenharia de Projetos Ltda. S.A., contratada por ELECTROPERU S.A. para desarrollar el Estudio Definitivo del Pondaje Quitaracsa y Ampliación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, teniendo en cuenta la necesidad de ejecutar ensayos en modelos hidráulicos reducidos, donde obtuvo un contrato con el Instituto Nacional de Ampliación de la Frontera Agrícola (Inaf) para la construcción, calibración y operación de dos modelos hidráulicos para la modificación y ampliación de la bocatoma y desarenador de la central hidroeléctrica.

El Laboratorio Nacional de Hidráulica fue la encargada de planificar y conducir los estudios respectivos. Las obras de ampliación comprenden modificaciones en la bocatoma y desarenador existentes; la construcción de una nueva bocatoma inmediatamente después aguas arriba de la existente con su respectivo túnel aductor, y la construcción de un nuevo desarenador paralelo al actual que se unirá a este mediante el túnel de baja presión. Los desarenadores, existente y proyectado, fueron contruidos con ladrillos y mortero de cemento – arena fina, y fueron representados con la totalidad de sus naves pero sin los detalles de los sistemas de purga. Una de las conclusiones acerca del desarenador existente es: *“La bocatoma existente logra captar su caudal de diseño, y aún superarlo, cuando se rebaja el nivel de coronación del vertedero de salida del desarenador existente y eliminando el vertedero de retención de sólidos (tolva). Lo mismo se verifica cuando se rebaja el nivel de la solera de la esclusa y el nivel de solera de la tolva de la bocatoma proyectada.*

Con la culminación de la instalación de la central hidroeléctrica con 150 MW, también se concluyó con la construcción de la tercera terna de la línea de transmisión Huallanca – Chimbote. En el año 1996 las instalaciones de la central hidroeléctrica pasa a las manos del sector privado con el compromiso de la repotenciación de la central, de las cuales se construyó una bocatoma complementaria, se repotenciaron los grupos de generación hidráulica, la Sub – Estación y otros equipos que permiten la adecuada operación de la central hidroeléctrica.

Con la implementación se mejora la operación de la central hidroeléctrica, con lo cual se logra incrementar la capacidad instalada a 263,49 MW.

En febrero del 2016, se desarrolló la Prueba de Potencia, gracias a las operaciones de mantenimiento, se obtuvo una capacidad instalada de 265,565 MW¹⁰.

2.3. Ubicación

La Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, está ubicada en el departamento de Ancash, provincia de Huaylas, sobre la margen derecha del río Santa, entre la quebrada Los Cedros y el río Quitaracsa.

¹⁰ (Duke Energy Egenor, 2014)

El acceso a la central hidroeléctrica desde Lima es por la ruta Callejón de Huaylas vía asfaltada Lima – Barranca – Huaraz – Caraz, y de Caraz a Huallanca mediante carretera asfaltada de 24 Km y afirmada de 14 Km, la otra ruta es desde Chimbote por la vía afirmada de 138 Km Chimbote – Chiquicara – Huallanca¹¹.

2.4. Características generales de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

La central hidroeléctrica aprovecha las aguas del río Santa, sus caudales fluctúan entre 24 a 800 m³/s.

Se presenta una breve descripción de las principales estructuras civiles de la central hidroeléctrica¹².

Bocatoma

Conformadas por las bocatoma Principal (antigua) y Complementaria (nueva), ubicadas en la margen derecha del río Santa.

Presa de derivación

Tiene la función de desviar las aguas hacia las bocatoma, se encuentra ubicada en el cauce del río Santa y está conformada de concreto armado de tipo gravedad. Además cuenta con una longitud de 32 m. En la actualidad se han realizado modificaciones debido a que las estructuras no cumplían con sus objetivos.

El canalón, que su función es captar los sólidos de fondo, se aumentó su pendiente en 4%, además se construyó un pilar de concreto para la instalación de una compuerta wagon que permite regular los niveles de aguas en la presa y la evacuación de los sólidos de fondo depositados en el canalón.

Bocatoma Principal

Diseñada para captar un caudal de 50 m³/s. Se encuentra perpendicular al eje de la presa, además posee un canalón para la retención de rocas grandes que arrastra el río Santa en la época de avenidas, luego se encuentra la esclusa que sirve para retener sólidos y materiales flotantes transportados, que contienen una compuerta de limpieza

¹¹ (Duke Energy Egenor, 2004)

¹² (Duke Energy Egenor, 2004)

y de mantenimiento, ambos de tipo wagon, estas son utilizadas para la limpieza de los sólidos acumulados en la esclusa. Las ventanas de captación que constan de ocho vanos de 2,24 m de longitud y 3,70 m de alto cada una de ellas, se encuentran ubicadas paralelas al eje de la esclusa en el nivel 1 803,90 m.s.n.m. aguas abajo, en dirección al desarenador, se ubica la compuerta de regulación tipo wagon.

Fotografía 2.1: Bocatoma Principal (Antigua)



Bocatoma Complementaria

Se construyó en el año 2000 con una capacidad de captación de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, con el objetivo de aumentar la generación de acuerdo a la nueva potencia instalada. Se encuentra ubicada a 500 m aguas arriba de la Bocatoma Principal, consta de:

- Vertedero de ingreso al pozo de sedimentación

Tiene una longitud de 32 m y se encuentra ubicada en la cota 1 806,70 m.s.n.m. cubierto con planchas metálicas. Después del vertedero se ubica el pozo de sedimentación, que tiene muros de encauzamiento y de deflectores en ambos lados.

- Túnel de limpia de sedimentos

Posee una longitud de 141,70 m, con sección tipo baúl de 4 m de ancho y 6,25 m de alto. El inicio del túnel comienza en la compuerta radial de limpia, que se ubica en la cota 1 762 m.s.n.m.

- Ventana de captación

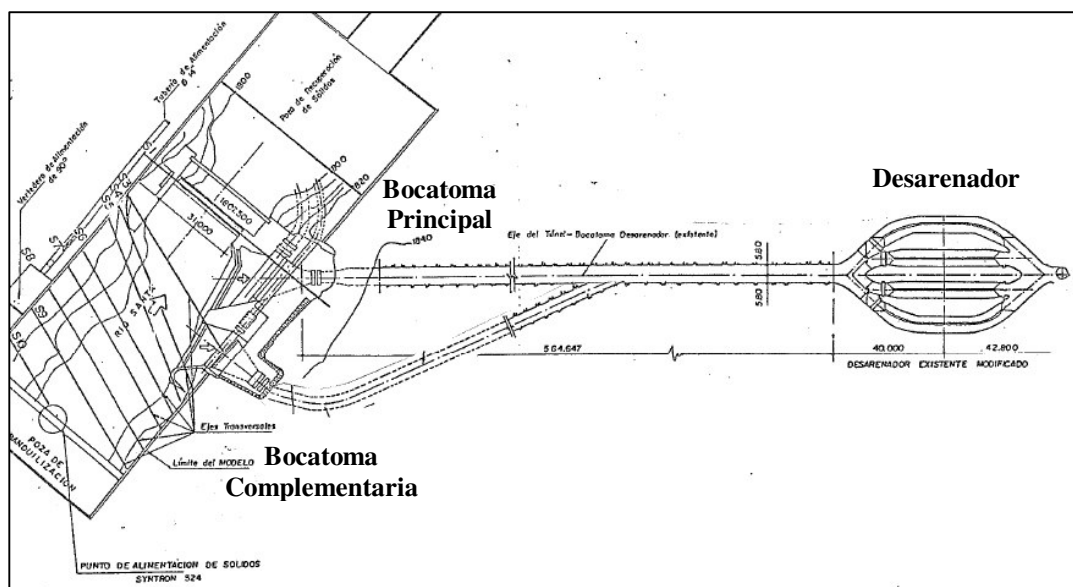
Contiene 4 ventanas de 4 m de alto, 2 de 3,935 m y 2 de 4,31 m de ancho, cada ventana tiene doble rejilla que sirve para retener los sólidos flotantes que arrastra el río Santa.

Fotografía 2.2: Bocatoma Complementaria (Nueva)



En la siguiente figura se muestra un esquema del túnel de aducción que une las bocatomas con el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. La bocatoma Principal se une con el desarenador mediante un túnel tipo baúl de 5 m de ancho por 6 m de alto y 555,37 m de longitud; mientras, que la bocatoma Complementaria se une al sistema mediante un túnel tipo baúl de 5,50 m de ancho y 8,75 m de alto y 214,32 m de longitud, hasta su empalme con el túnel de la bocatoma Principal.

Figura 2.1: Esquema representativo del sistema bocatoma (Principal y Complementaria) – desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



Túnel de aducción

Une las bocatomas con el desarenador, tiene una longitud de 560 m y 6 m de ancho, la conducción del agua en el tramo no es a presión y no está revestido.

Desarenador

Ubicado en caverna, tienes dos accesos al exterior:

Nivel 1 795 m.s.n.m., se encuentra la galería inferior de inspección con una longitud de 143 m, donde se encuentran las cuatro naves, las válvulas de purga, los tableros de control y PLC de los equipos de purga.

Nivel 1 813 m.s.n.m., se encuentra la galería superior donde se visualizan las tabiquerías en las naves y presentan barandas para la inspección.

En el nivel 1 800,46 m.s.n.m., se ingresa al túnel de aducción donde se encuentra una compuerta desripadora, con el objetivo de evacuar cantos rodados de tamaño mediano, luego se ubican cuatro compuertas desarenadoras, una compuerta por cada nave que tienen la función de evacuar los sólidos sedimentados.

El desarenador está compuesto de cuatro naves tabicadas, con 6,40 m de ancho y 31 m de longitud en las naves centrales y 36 m en las naves laterales; para el caudal de

diseño de 48 m³/s, el caudal en las naves centrales y laterales es de 16 m³/s y 8 m³/s respectivamente, el sistema de purga encuentra conformado por 40 a 42 válvulas guillotinas por nave, cuentan con un sistema de estrangulamiento denominado Pinch.

En la galería de descarga de 140 m de longitud, se realiza la evacuación de los sólidos decantados en las naves y compuertas.

A la salida de las cuatro naves se encuentra un vertedero con cota 1 804,40 m.s.n.m. hasta la cota 1 771,95 m.s.n.m. formando un pique de forma circular de 5 m de diámetro.

En la cota 1 771,50 m.s.n.m. inicia el túnel principal de conducción.

Túnel de conducción

Inicia en el pique del desarenador con una longitud de 8 385 m, con pendientes que oscilan entre +/- 0.4%, está construido de concreto armado de sección tipo herradura de 2,70 m de radio en la parte circular y 5,80 m de altura, la sección tiene un área de 24,16 m² y el flujo de agua a través del túnel es a presión. Además, cuenta con cinco ventanas para fines de inspección o purga, para acceder a ellas se realiza el cruce mediante oroyas y caminos peatonales.

El tramo final tiene una longitud de 70 m, de sección circular con un diámetro de 5 m, está revestido con planchas metálicas hasta el empalme con la cámara de distribución.

Cámara de distribución

Finalizando el túnel de conducción se encuentra de forma perpendicular la cámara de distribución de sección circular de 5 m de diámetro y 52,30 m de longitud, a partir de esta estructura se suministra el caudal a los seis grupos de generación mediante tres tuberías a presión empotrados en roca, cuya sección es circular con diámetros que varían entre 2,20 m y 1.90 m

Chimenea de equilibrio

Se encuentra en la intersección de la cámara de carga y el túnel de conducción, tiene una altura de 65 m y una sección circular con diámetro de 5 m, se encuentra revestido

con placas metálicas, su función es disipar las sobrepresiones por el cierre de válvulas.

Cámara de expansión

Construido en caverna, ubicado en la cota 1 814,73 m.s.n.m., de forma rectangular con 70 m de longitud y 45 m de ancho, la sección es de tipo herradura con 5,40 m de diámetro y está revestido de concreto.

Casa de fuerza

Tiene una longitud de 117 m, un ancho de 11 m y 15 m de altura, construida en caverna y está conectada al exterior mediante un túnel de acceso de 360 m de longitud. El túnel de ventilación tiene una longitud de 446.93 m y se encuentra al fondo de la casa de fuerza con salida al río Quitaracsa, está revestido de concreto con una sección tipo baúl de 2,50 m de ancho y 2,50 m de alto.

Los seis grupos de generación, cada grupo con dos ruedas Pelton de eje horizontal, se encuentran instalados en este lugar. Mediante dos túneles se descargan las aguas turbinadas hacia el río Santa; los túneles tienen 550 m de longitud, 4,70 m de ancho y una altura de media de 5,50 m.

En el nivel 1 401,60 m.s.n.m., en el interior de casa de fuerza, el área se denomina mezanine, ahí se encuentran instalada la sala de control y mandos.

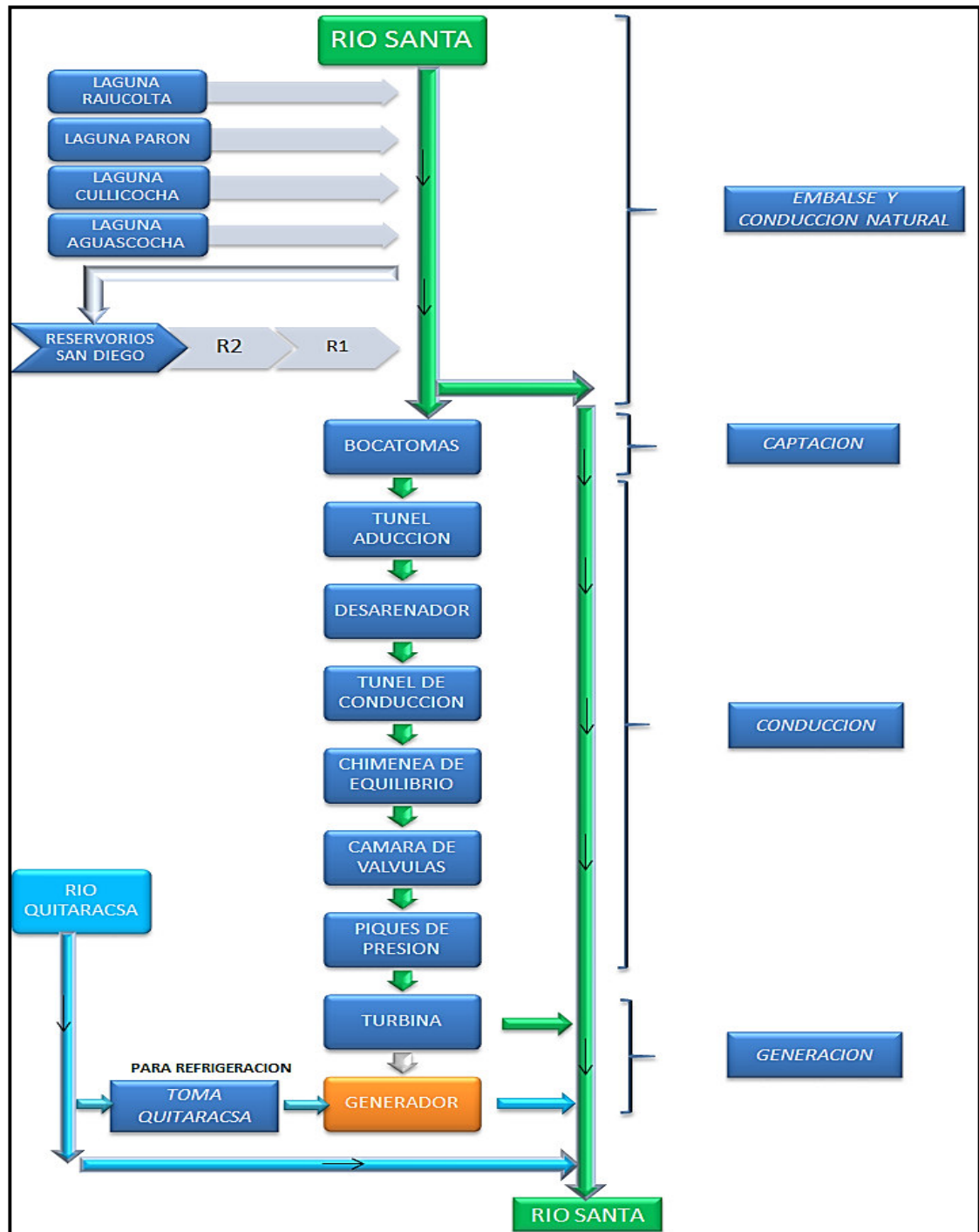
El ascensor hacia los accesos exteriores se encuentra en el interior de casa de fuerza, donde se llega a la parte exterior de la cámara de distribución y piques. Este ascensor recorre las cotas 1 401,59 m.s.n.m. en la parte inferior, hasta la cota 1 830 m.s.n.m. donde se encuentra la plataforma exterior del pique.

Sistema de refrigeración

Capta las aguas del río Quitaracsa, mediante una toma ubicada a 353 m aguas abajo de la estructura del sistema de sedimentación en la margen izquierda, este sistema está compuesto por tres pozas de sedimentación, una de ellas utilizada para el tratamiento de agua para el consumo del campamento, que se encuentra a 2 Km, y

para la localidad de Huallanca, mientras que las dos restantes es utilizada para el sistema de refrigeración de la central hidroeléctrica.

Figura 2.2: Esquema Hidráulico General de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



3. DESCRIPCION DE LA CUENCA DEL RIO SANTA

3.1. Generalidades

Ubicación

La cuenca del río Santa se encuentra ubicada al norte-oeste del Perú, considerada la segunda cuenca con mayor tamaño en la vertiente del Pacífico de nuestro país, con un área de 12 200 Km², donde abarca las siete provincias del departamento de Ancash, y dos provincias del departamento de La Libertad. El recorrido del río Santa es de Sur a Norte entre la Cordillera Blanca debido a la presencia de glaciares, margen derecha, y la Cordillera Negra árida y semi árida por la margen izquierda. Aguas abajo, aproximadamente a 200 Km de su origen, el río Santa corta la cordillera en el Cañón de Pato con dirección Oeste a su desembocadura en el Océano Pacífico¹³.

La cuenca húmeda del río Santa tiene una extensión de 10 200 Km², que es la superficie que contribuye efectivamente con la escorrentía superficial.

El desarrollo longitudinal del río Santa es aproximadamente 294 Km, desde su origen hasta su desembocadura, con una pendiente promedio de 1,4%, que se hace más acentuada en una longitud de 13 Km comprendida entre las desembocaduras de las quebradas de los ríos Cedros y Quitaracsa, formando el Cañón del Pato, donde se ubica la central hidroeléctrica del mismo nombre¹⁴.

Clima

El clima es muy diverso en la cuenca del río Santa, las temperaturas por encima de los 2 000 m.s.n.m. presentan variaciones horarias muy marcadas durante el día de hasta 20 °C, estas variaciones van aumentando conforme las elevaciones sean mayores. Los meses más fríos en la cuenca son de Mayo a Agosto, en este intervalo de meses se presenta las heladas¹⁵.

La lluvia es de mayor intensidad en el día, en los meses de Enero a Marzo alcanzando hasta 20 mm/día, además se presenta con mucha frecuencia fuertes granizadas y

¹³ (Morera, 2010)

¹⁴ (Duke Energy Egenor, 2014)

¹⁵ (Ministerio de Agricultura, 2005)

nevadas. La precipitación total anual varía desde los 100 mm/año en la Costa hasta los 1 000 mm/año en la Cuenca Alta, por encima de los 4 800 m.s.n.m. En la Cordillera Blanca predominan las precipitaciones sólidas en forma de nieve.

En la zona del Cañón el clima es cálido. En Huallanca las temperaturas máximas se mantienen entre los 28 °C a 30 °C durante todo el año, las horas de sol son permanentes durante todo el día alcanzando temperaturas promedio de 18 °C, las lluvias se presentan intensas en la época de avenida que comprenden los meses de Febrero y Marzo alcanzando 15 mm/día en promedio, este clima se manifiesta hasta Chuquicara, que se comporta como un clima típico de la Costa, es decir fuerte brillo solar en verano, neblina y bajas temperaturas en invierno y con escasez absolutas de lluvias¹⁶.

Geología y geodinámica

La Cordillera Blanca está constituida por granodiorita, limitadas por sedimentos del Cretáceo y Pleistoceno, este último debido a depósitos de morrenas glaciares y cubierta por sedimentos más antiguos de formación Calipuy. Donde se han presentado eventos como plegamiento, compresión y sobre escurrimiento del basamento sedimentario. Las tendencias estructurales en la región con rumbo al noreste corresponden al río Santa, mientras al rumbo noroeste atraviesan el valle.

La Cordillera Negra, en la parte del volcánico Calipuy alberga depósitos minerales, estos depósitos están asociados a un cinturón hidrotermal, tienen tendencia al noroeste, paralelo al valle del río Santa con una longitud de 70 Km.

La formación de la cuenca tiene sus orígenes en las manifestaciones geológicas como las fallas y fuertes plegamientos. Las deformaciones son consecuencia de la orogénesis andina, es decir en la formación de montañas y cordilleras, además los esfuerzos resultantes de la tectónica de placas que afecta a los Andes son producto del movimiento epirogénico. Estos procesos se encuentran en constante evolución.

¹⁶ (Duke Energy Egenor, 2014)

Humedad

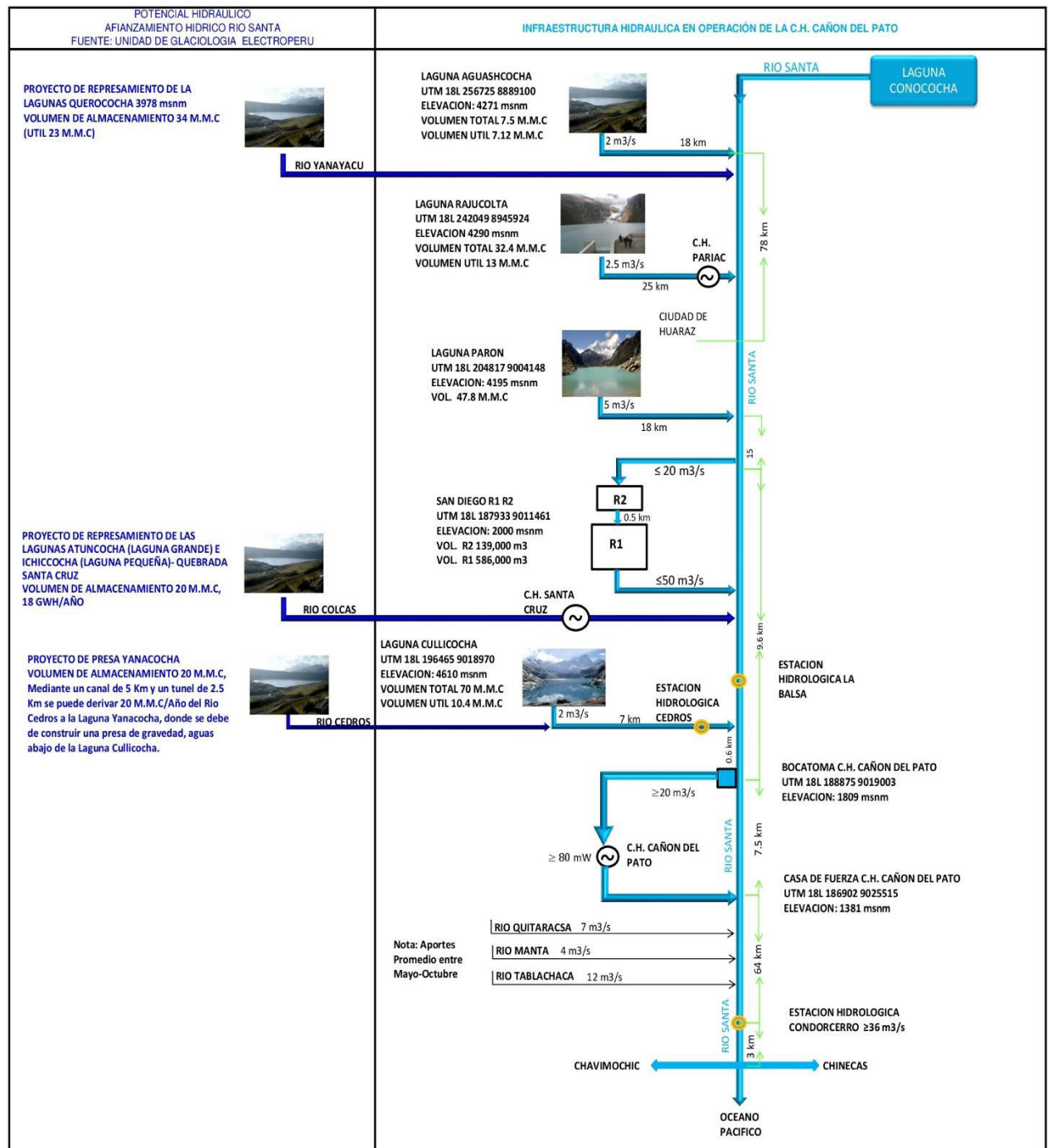
En la Cordillera Blanca, la temporada más húmeda se debe a las masas de aire húmedo traídas de la cuenca amazónica, provocado por la oscilación de la zona de convergencia intertropical (ITCZ), 70-80% de la precipitación anual y durante la temporada seca la oscilación de la zona de convergencia intertropical se encuentra hacia el norte y los vientos alisos generan condiciones secas.

La humedad relativa en la Costa es de 78%, mientras que en la Sierra es de 65% y la evaporación total anual varía entre 870 mm/año en la Costa hasta unos 1 400 mm/año en la Puna¹⁷.

¹⁷ (Morera, 2010)

3.2. Diagrama topológico de la cuenca

Figura 3.1: Infraestructura Hidráulica en Operación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



3.3. Reservorios de regulación en la cuenca¹⁸

La Central Hidroeléctrica Cañón del Pato cuenta con tres embalses de regulación y un reservorio de regulación diaria en la cuenca del río Santa, que permite el abastecimiento de recurso hídrico para la generación de energía eléctrica.

Cuadro 3.1: Embalses de regulación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

Descripción		Cullicocha	Aguashcocha	Rajucolta
Ubicación	Departamento	Ancash	Ancash	Ancash
	Provincia	Huaylas	Recuay	Huaraz
	Distrito	Santa Cruz	Catac	Restauración
Características de la cuenca	Cuenca	Cullicocha	Tucu	Pariac
	Área (Km ²)	110	49,41	17,78
	Altitud (m.s.n.m.)	4610	4271	4290
	Coordenadas UTM	E: 196 465 m N: 9 018 970 m	E: 256 725 m N: 8 889 100 m	E: 242 049 m N: 8 945 924 m
Nivel de operación (m.s.n.m.)	Máximo	4533,53	4277,50	4290,88
	Mínimo	4522,03	4271,50	4272,61
	Máximo extraordinario		4278,36	4292,08
Volumen de operación (MMC)	Máximo	10,46	7,81	10,80
	Mínimo	0,00	0,00	0,00
	Útil	10,46	7,81	10,80
Tiempo estimado (horas)		8,00	20,00	12,00

El tiempo estimado se expresa en el Cuadro 3.1 se refiere al tiempo de desplazamiento del volumen de agua desde los reservorios hasta la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

Reservorio de regulación diaria San Diego

El reservorio San Diego se encuentra ubicado en el distrito de Santa Cruz, provincia de Huaylas, departamento de Ancash, en la margen derecha del río Santa a una altura de 2 000 m.s.n.m.

El reservorio de regulación diaria está conformada por las siguientes estructuras:

- Bocatoma de captación: se encuentra en la margen derecha del río Santa con una capacidad de captación de 25 m³/s, cuenta con un barraje móvil

¹⁸ (Duke Energy Egenor, 2014)

conformado con estructuras de ataguías que se instalan al inicio de cada periodo de operación.

- Túnel de conexión: tiene una longitud de 667,70 m con una sección típica de forma de baúl de 3 m de ancho y 3,60 de altura, de las cuales está revestido de concreto armado y tiene una pendiente uniforme de 1,22%.
- El conducto cubierto: conformada por una sección tipo baúl de 3 m de ancho y 2,10 m de altura coronada por un arco de media punta de 1,50 de radio.
- Reservorios de regulación: se encuentran ubicados en la margen derecha del río Santa sobre terrazas ubicadas aguas debajo de la bocatoma y están conectadas por el túnel de conexión que trabaja como vasos comunicantes. Los reservorios de regulación tienen una capacidad total de almacenamiento de 705 802 m³.
- Canal de descarga: tiene la capacidad de evacuar un caudal máximo de 50 m³/s, cuenta con un dissipador de energía de 8,50 m de ancho y una longitud de poza de 11 m, de las cuales se ha construido dados blindados con la finalidad de controlar el resalto hidráulico y reducir la longitud de la poza.

Fotografía 3.1: Reservorio de regulación diaria San Diego – R2 (captación)



3.4. Características hidrológicas del río Santa en el sitio de aprovechamiento de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

El río Santa es uno de los ríos más caudalosos de la costa y cuenta con un escurrimiento muy regular, mantiene en época de estiaje un caudal de 56,60 m³/s en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato lo cual lo hace interesante en el aprovechamiento de sus aguas¹⁹.

Para obtener los caudales medios mensuales históricos y naturalizados en el río Santa en el lugar de aprovechamiento de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato la empresa encargada de su administración y operación realizó un Estudio Hidrológico en Mayo 2014.

A continuación, se presentan las estaciones meteorológicas e hidrométricas en la cuenca del río Santa administradas por la empresa, utilizadas en el estudio hidrológico.

Estaciones Meteorológicas

Las estaciones meteorológicas son de tipo automática y registran precipitación, evapotranspiración, velocidad y dirección del viento, temperatura promedio, máxima y mínima entre otros.

¹⁹ (Díaz, 1991)

Cuadro 3.2: Estaciones meteorológicas de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

Estación Meteorológica	Ubicación	Coordenadas UTM	Altitud (m.s.n.m.)	Inicio de registro de información
Aguashcocha (M1)	Laguna Aguashcocha	8 889 100 N 256 725 E	4285	Enero 2004
Parón (M2)	Laguna Parón	9 004 148 N 240 817 E	4195	Enero 2003
Hidroeléctrica (M3)	C. H. Cañón del Pato	9 024 576 N 186 126 E	1457	Enero 2002
Limacllán (M4)	Línea 138 Kv Huallanca - Chimbote	9 021 030 N 181 993 E	3239	Febrero 2003
Rajucolta (M5)	Laguna Rajucolta	8 945 924 N 242 049 E	4277	Octubre 2005
Cullicocha (M6)	Laguna Cullicocha	9 018 970 N 196 465 E	4617	Septiembre 1999

Estaciones Hidrométricas

Cuadro 3.3: Estaciones hidrométricas de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

Estaciones Hidrométricas	Ubicación	Coordenadas UTM	Altitud (m.s.n.m.)	Tipo de registro
Carhuaz (H1)	Cuenca media del río Santa - Carhuaz.	8 972 866 N 208 596 E	2607	Caudales a tiempo casi real.
Los Cedros (H2)	Río Los Cedros, antes de desembocar en el río Santa.	9 018 780 N 189 500 E	1865	Caudales a nivel diario.
La Balsa (H3)	En el río Santa antes de llegar al río Los Cedros.	9 017 718 N 189 294 E	1869	Caudales a nivel diario.

Tabla 3.1: Caudales medios mensuales históricos (La Balsa + Los Cedros) (m³/s) disponibles en la Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Periodo 1954-2013

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1954	239,37	133,56	200,66	90,03	68,03	46,13	37,49	37,23	43,74	52,87	61,67	83,28
1955	100,24	280,44	304,34	219,92	68,53	46,85	34,68	30,75	30,98	48,03	59,29	91,71
1956	103,03	193,33	204,55	208,36	83,57	46,11	32,74	29,59	34,19	54,43	56,28	73,49
1957	89,41	169,04	195,42	137,21	72,79	41,55	35,79	35,83	42,14	66,69	93,72	105,20
1958	131,21	124,35	212,93	142,95	76,49	47,04	36,87	36,08	45,95	52,49	77,07	73,56
1959	81,01	110,13	181,54	128,50	85,27	51,68	39,49	45,86	41,46	67,39	67,75	107,33
1960	191,90	258,12	317,37	182,66	75,47	54,45	43,99	45,60	38,04	52,08	68,05	76,11
1961	164,77	118,47	189,55	192,60	75,63	42,60	31,90	29,14	26,82	37,51	81,32	133,83
1962	198,27	274,68	366,83	171,07	52,23	41,21	34,71	35,94	40,68	40,30	67,77	76,52
1963	130,59	149,02	286,31	193,23	71,28	40,08	31,80	32,26	39,77	45,89	89,73	146,66
1964	131,33	176,79	211,64	171,18	83,10	40,32	36,01	33,41	30,69	53,25	74,12	62,50
1965	73,84	104,87	234,63	109,04	63,08	36,07	29,54	29,97	45,96	67,35	72,15	97,65
1966	159,81	151,99	122,47	82,16	61,56	44,24	41,36	42,72	48,98	87,20	93,89	97,73
1967	136,84	373,59	323,13	101,53	61,22	39,66	31,35	30,17	35,18	75,01	70,15	73,89
1968	96,73	99,72	130,64	70,25	41,88	33,95	29,96	27,45	38,54	61,18	69,99	80,01
1969	87,42	102,92	141,73	137,13	66,03	50,44	37,46	39,63	40,29	70,05	86,96	153,79
1970	188,26	121,47	128,41	163,18	127,30	60,64	45,66	45,29	48,27	70,24	97,02	131,82
1971	139,85	210,76	294,38	140,97	59,87	42,03	36,46	36,45	33,91	58,66	62,58	111,01
1972	137,39	167,20	273,99	204,56	100,42	59,24	39,43	36,08	37,97	49,45	71,22	100,00
1973	127,66	127,54	226,79	235,37	101,37	44,73	34,64	33,86	39,70	83,10	117,33	139,85
1974	203,60	298,29	278,11	166,65	63,94	45,11	31,89	28,70	28,54	43,30	62,91	83,71
1975	119,80	138,40	283,46	153,99	90,90	44,91	31,11	32,32	35,91	51,90	63,60	69,18
1976	118,05	160,73	175,84	98,63	50,16	36,13	25,75	24,03	27,63	47,07	52,46	67,01
1977	120,39	190,22	188,73	87,71	55,50	36,67	32,08	37,57	38,90	48,34	94,40	97,73
1978	100,37	141,92	113,53	85,16	56,33	38,84	34,09	33,92	43,98	45,21	79,81	93,41
1979	96,70	149,13	261,97	114,09	63,55	44,90	37,25	37,34	40,92	51,80	66,91	75,51
1980	93,77	90,66	85,73	71,82	43,18	39,03	30,95	33,79	50,00	67,26	81,55	121,19
1981	89,92	97,51	190,74	98,02	49,20	36,33	31,39	28,11	26,39	56,51	88,69	86,01
1982	90,21	146,82	60,00	84,36	50,37	36,93	29,99	27,19	29,28	59,96	91,94	116,72
1983	140,51	101,50	163,64	173,25	59,66	43,88	35,06	31,93	32,56	45,73	62,47	92,09
1984	72,86	258,34	308,31	172,47	94,69	46,12	29,38	26,26	28,96	63,86	51,89	85,01
1985	109,71	115,34	128,21	112,55	56,30	30,76	25,61	27,15	70,58	63,95	90,25	80,07
1986	188,23	158,83	144,99	143,26	60,02	34,64	28,06	26,04	33,98	51,78	74,80	94,63
1987	198,54	180,38	143,56	96,45	61,00	35,82	30,42	24,46	44,94	60,36	87,09	123,54
1988	172,39	169,59	116,49	136,85	70,54	38,09	30,34	30,34	43,09	56,90	70,86	66,88
1989	138,59	205,80	217,89	190,88	65,65	37,85	27,77	27,29	29,67	60,87	64,53	56,96
1990	106,86	100,68	97,77	74,97	51,22	31,34	23,90	25,18	28,47	66,49	100,83	85,62
1991	90,01	104,35	242,98	75,96	67,09	38,14	30,83	32,01	29,50	44,35	45,23	70,82
1992	78,53	70,49	99,82	85,46	46,51	32,06	25,67	28,19	28,45	39,70	43,59	54,98
1993	92,05	178,02	201,54	188,55	75,59	36,35	30,33	30,85	45,32	67,89	130,68	154,97
1994	216,73	294,40	268,73	177,81	72,59	42,31	36,31	33,53	29,88	32,93	50,52	73,11
1995	107,00	103,55	168,65	159,47	61,07	39,39	30,95	36,79	40,62	45,86	75,10	100,18
1996	145,68	199,24	213,67	175,01	61,13	40,24	35,81	36,80	38,05	48,95	52,22	51,94
1997	84,10	152,78	102,64	57,03	44,16	34,32	30,84	34,94	43,85	44,47	88,89	214,38
1998	298,59	497,82	563,35	364,53	113,49	47,26	37,77	38,03	39,38	65,76	70,28	55,59
1999	93,11	407,30	292,74	154,21	78,48	41,52	32,20	34,74	43,55	42,72	55,47	118,36
2000	83,74	327,44	481,94	273,63	119,56	43,41	32,56	31,03	30,75	34,68	48,09	83,70
2001	321,91	123,12	262,81	137,34	56,95	32,66	28,62	30,95	34,01	41,17	126,09	131,70
2002	104,04	155,64	264,64	198,58	54,57	36,88	33,96	35,03	33,51	54,72	120,64	155,46
2003	148,54	152,09	247,66	135,07	55,05	34,71	31,91	33,45	34,94	48,28	49,82	102,46
2004	74,13	108,30	82,28	77,54	42,87	31,81	25,53	26,73	24,40	53,55	90,02	98,88
2005	100,57	106,72	154,40	91,18	50,55	38,54	34,41	33,05	36,34	46,12	51,77	95,14
2006	81,92	126,14	234,70	272,37	53,52	38,40	31,39	29,90	33,78	42,51	60,03	124,64
2007	135,77	116,23	288,06	221,98	71,64	37,02	28,77	30,03	28,08	42,14	61,95	63,98
2008	151,76	191,31	200,86	149,29	54,82	33,92	29,68	24,18	24,33	51,25	65,06	65,12
2009	160,17	308,73	407,69	339,94	88,61	43,82	29,45	30,31	34,60	54,60	96,47	228,94
2010	179,54	171,32	177,46	137,00	68,25	37,72	33,82	35,12	31,83	41,04	66,28	206,71
2011	291,40	164,69	147,43	188,38	62,12	38,00	31,06	28,35	25,95	30,36	58,57	126,61
2012	140,90	228,03	158,07	170,61	76,14	36,05	28,80	27,51	27,86	38,87	74,72	88,57
2013	91,47	130,03	267,31	107,74	54,91	30,78	24,56	26,19	29,25	52,99	55,69	101,93

Tabla 3.2: Caudales medios mensuales naturales (La Balsa + Los Cedros) (m³/s) disponibles en la Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Periodo 1954 - 2013

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1954	239,37	133,56	200,66	90,03	68,03	46,13	37,49	37,23	43,74	52,87	61,67	83,28
1955	100,24	280,44	304,34	219,92	68,53	46,85	34,68	30,75	30,98	48,03	59,29	91,71
1956	103,03	193,33	204,55	208,36	83,57	46,11	32,74	29,59	34,19	54,43	56,28	73,49
1957	89,41	169,04	195,42	137,21	72,79	41,55	35,79	35,83	42,14	66,69	93,72	105,20
1958	131,21	124,35	212,93	142,95	76,49	47,04	36,87	36,08	45,95	52,49	77,07	73,56
1959	81,01	110,13	181,54	128,50	86,27	51,68	39,49	45,86	41,46	67,39	67,75	107,33
1960	191,90	258,12	317,37	182,66	75,47	54,45	43,99	45,60	38,04	52,08	68,05	76,11
1961	164,77	118,47	189,55	192,60	75,63	42,60	31,90	29,14	26,82	37,51	81,32	133,83
1962	198,27	274,68	366,83	171,07	52,23	41,21	34,71	35,94	40,68	40,30	67,77	76,52
1963	130,59	149,02	286,31	193,23	71,28	40,08	31,80	32,26	39,77	45,89	89,73	146,66
1964	131,33	176,79	211,64	171,18	83,10	40,32	36,01	33,41	30,69	53,25	74,12	62,50
1965	73,84	104,87	234,63	109,04	63,08	36,07	29,54	29,97	45,96	67,35	72,15	97,65
1966	159,81	151,99	122,47	82,16	61,56	44,24	41,36	42,72	48,98	87,20	93,89	97,73
1967	136,84	373,59	323,13	101,53	61,22	39,66	31,35	30,17	35,18	75,01	70,15	73,89
1968	96,73	99,72	130,64	70,25	41,88	33,95	29,96	27,45	38,54	61,18	69,99	80,01
1969	87,42	102,92	141,73	137,13	66,03	50,44	37,46	39,63	40,29	70,05	86,96	153,79
1970	188,26	121,47	128,41	163,18	127,30	60,64	45,66	45,29	48,27	70,24	97,02	131,82
1971	139,85	210,76	294,38	140,97	59,87	42,03	36,46	36,45	33,91	58,66	62,58	111,01
1972	137,39	167,20	273,99	204,56	100,42	59,24	39,43	36,08	37,97	49,45	71,22	100,00
1973	127,66	127,54	226,79	235,37	101,37	44,73	34,64	33,86	39,70	83,10	117,33	139,85
1974	203,60	298,29	278,11	166,65	63,94	45,11	31,89	28,70	28,54	43,30	62,91	83,71
1975	119,80	138,40	283,46	153,99	90,90	44,91	31,11	32,32	35,91	51,90	63,60	69,18
1976	118,05	160,73	175,84	98,63	50,16	36,13	25,75	24,03	27,63	47,07	52,46	67,01
1977	120,39	190,22	188,73	87,71	55,50	36,67	32,08	37,57	38,90	48,34	94,40	97,73
1978	100,37	141,92	113,53	85,16	56,33	38,84	34,09	33,92	43,98	45,21	79,81	93,41
1979	96,70	149,13	261,97	114,09	63,55	44,90	37,25	37,34	40,92	51,80	66,91	75,51
1980	93,77	90,66	85,73	71,82	43,18	39,03	30,95	33,79	50,00	67,26	8155	121,19
1981	89,92	97,51	190,74	98,02	49,20	36,33	31,39	28,11	26,39	56,51	88,69	86,01
1982	90,21	146,82	60,00	84,36	50,37	36,93	29,99	27,19	29,28	59,96	91,94	116,72
1983	140,51	101,50	163,64	173,25	59,66	43,88	35,06	31,93	32,55	45,73	62,47	92,09
1984	72,86	258,34	308,31	172,47	94,69	46,12	29,38	26,26	28,96	63,86	51,89	85,01
1985	109,71	115,34	128,21	112,55	56,30	30,76	25,61	27,15	70,58	63,95	90,25	80,07
1986	188,23	158,83	144,99	143,26	60,02	34,64	28,06	26,04	33,98	51,78	74,80	94,63
1987	198,54	180,38	143,56	95,45	61,00	35,82	30,42	24,46	44,94	60,36	87,09	123,54
1988	172,39	169,59	116,49	138,85	70,54	38,09	30,34	30,34	43,09	56,90	70,86	66,88
1989	138,59	205,80	217,89	190,88	65,65	37,85	27,77	27,29	29,67	60,87	64,53	56,96
1990	106,86	100,68	97,77	74,97	51,22	31,34	23,90	25,18	28,47	66,49	100,83	85,62
1991	90,01	104,35	242,98	75,96	67,09	38,14	30,83	32,01	29,50	44,35	45,23	70,82
1992	78,53	70,49	99,82	85,46	46,51	32,06	25,67	28,19	28,45	39,70	43,59	54,98
1993	92,05	178,02	201,54	188,55	75,59	36,35	30,33	30,85	45,32	67,89	130,68	154,97
1994	216,73	294,40	268,73	177,81	72,59	42,31	36,31	33,53	29,88	32,93	50,52	73,11
1995	107,00	103,55	168,65	159,47	61,07	39,39	30,95	36,79	40,62	45,86	75,10	100,18
1996	145,68	199,24	213,67	175,01	61,13	40,24	35,81	36,80	38,05	48,96	52,22	51,94
1997	84,10	152,78	102,64	57,03	44,16	34,32	30,84	34,94	43,85	44,47	88,89	214,38
1998	303,05	503,05	565,54	366,05	115,18	47,70	33,31	32,91	36,78	67,53	72,47	56,96
1999	95,24	410,71	294,23	155,01	78,52	40,95	30,13	27,39	37,80	40,11	55,24	119,24
2000	84,57	330,25	484,78	275,34	120,17	43,95	29,92	24,74	26,25	33,64	48,31	85,81
2001	324,86	125,56	266,05	138,79	57,79	32,91	26,58	22,39	32,80	40,80	128,49	134,39
2002	106,53	158,18	267,91	200,64	55,38	33,53	31,81	27,24	29,64	55,76	122,88	157,89
2003	151,22	155,27	250,41	137,24	55,62	34,74	29,33	25,16	30,04	47,53	50,29	106,95
2004	76,32	110,75	84,43	79,30	43,63	26,57	21,40	21,74	24,12	54,37	94,23	102,09
2005	105,61	110,85	157,88	92,70	49,33	33,64	29,49	28,02	32,08	45,10	52,37	97,88
2006	87,52	128,76	238,90	275,69	54,33	36,33	26,16	22,84	28,94	42,62	62,50	130,21
2007	139,75	119,98	290,91	224,25	72,35	34,46	25,59	25,98	24,15	41,54	62,18	63,21
2008	156,22	194,19	203,30	151,42	54,77	32,06	25,28	11,87	24,43	52,01	66,51	67,34
2009	162,08	310,32	408,44	340,09	88,54	43,45	28,99	28,55	31,51	53,67	97,33	231,60
2010	181,08	172,83	177,80	137,28	68,35	36,48	32,16	33,41	29,60	38,49	66,79	209,91
2011	292,53	165,64	148,37	189,28	62,11	35,79	28,82	26,32	24,74	30,18	59,34	130,16
2012	141,86	229,51	159,47	171,85	76,40	35,45	26,93	25,08	25,11	37,44	76,10	91,07
2013	94,36	130,70	268,07	108,05	54,49	30,48	22,42	23,55	27,45	52,72	57,00	105,34

4. DESARENADORES

4.1. Introducción al estudio de desarenadores en centrales hidroeléctricas

Los desarenadores son estructuras hidráulicas indispensables en las centrales hidroeléctricas debido a que cumple una función muy importante en el proceso de la generación eléctrica, que es decantar y eliminar las partículas más finas de los sólidos que se encuentran en suspensión en la masa fluida, esta acción permite el mantenimiento y la operación de las estructuras hidráulicas y los equipos electromecánicos.

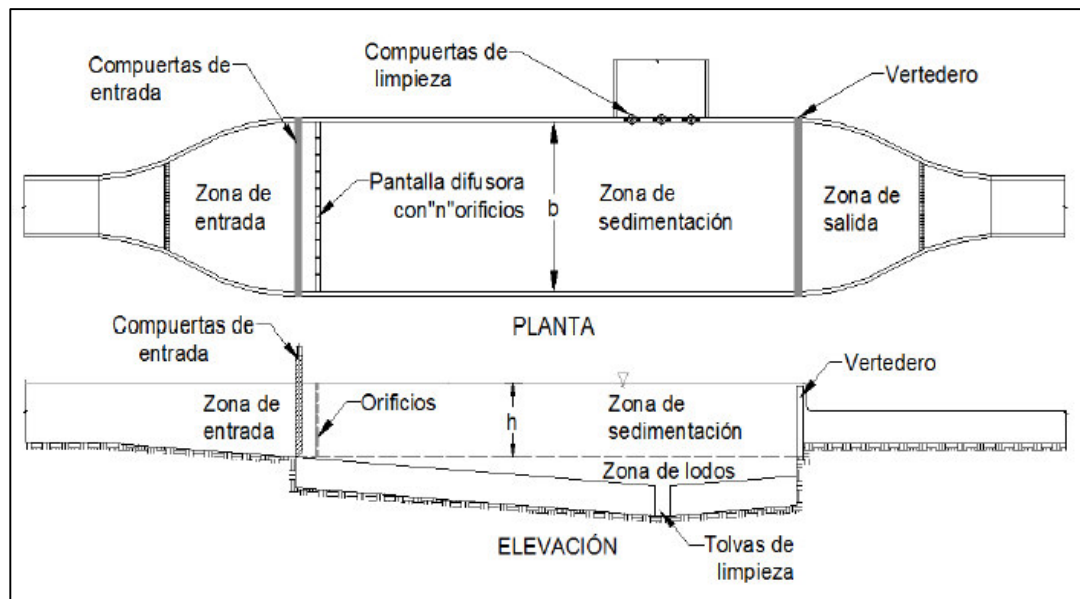
4.1.1. Criterios generales

Cumple con los siguientes objetivos técnicos²⁰:

- Separar el material sólido que pudo ser captado en la bocatoma de las centrales hidroeléctricas.
- Expulsar el material sólido retenido antes de que ingrese a la conducción principal, en el tramo ubicado lo más cerca posible al curso natural.
- Mantener la eficiencia de las estructuras hidráulicas y su capacidad de regulación debido a la eliminación del material sólido sedimentable.
- Evitar el desgaste desmedido de los equipos electromecánicos, que se debe por la interacción de los sólidos en el flujo de agua que genera la electricidad eléctrica.
- Disminuir los problemas asociados con la pérdida de la sección transversal de flujo debido a los depósitos de sólidos.
- Minimizar los costos de operación y mantenimiento dado que se disminuye las interrupciones del flujo para la limpieza de los diferentes componentes del sistema.

²⁰ (Proaño, 2013)

Figura 4.1: Desarenador, zonas que lo conforman

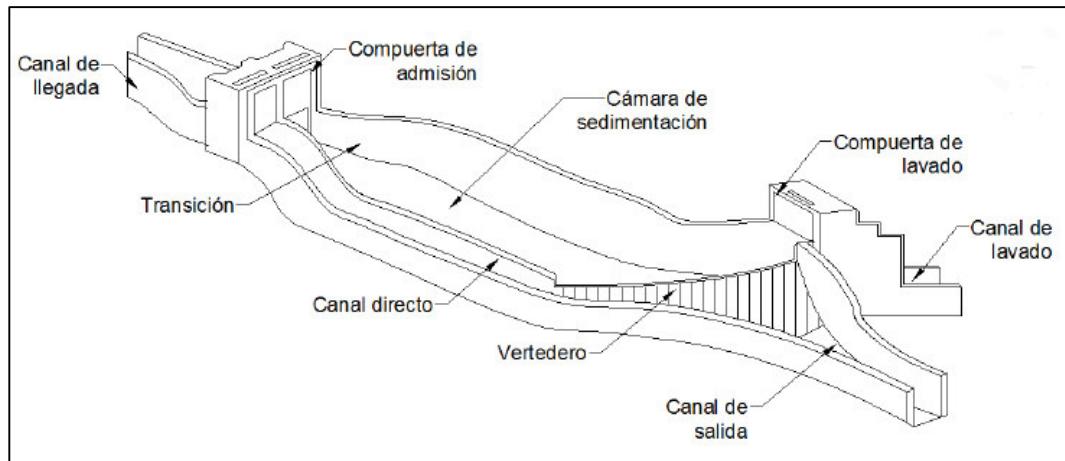


4.1.2. Componentes y zonas de un desarenador

Zonas de un desarenador:

- Zona de entrada: es una transición de entrada que une el canal o conducto que transporta el líquido a sedimentar con las naves del desarenador. Su función principal es uniformizar las líneas de corriente del flujo dentro de la unidad.
- Zona de sedimentación: es la parte donde se realiza la sedimentación de las partículas sólidas por acción de la gravedad.
- Zona de salida: conformado por un vertedero ubicado en todo el ancho de la zona de desarenación, que permite mantener una velocidad que no altere el reposo del material sedimentado.
- Zona de depósito y eliminación de material sedimentado: conformado por una tolva con una pendiente lo suficiente para permitir el deslizamiento del material sedimentado hacia el canal de limpieza.

Figura 4.2: Componentes generales de un desarenador



Componentes generales de un desarenador

En forma general, los desarenadores presentan siguientes estructuras componentes:

- Canal de llegada y compuerta de admisión.
- Transición de entrada y de salida.
- Cámaras de desarenación o de sedimentación.
- Vertedero de salida y canal de recolección.
- Tolvas, compuertas y canal de limpieza.
- Canal de servicio directo o de desvío.
- Canal de entrega al curso natural.

4.1.3. Tipos de desarenadores

En función de su operación

- Desarenadores de lavado continuo: en donde los procesos de sedimentación y de evacuación se dan de forma simultánea.
- Desarenadores de lavado intermitente: el primer proceso almacena las partículas sólidas, mientras que el segundo proceso expulsa al material sedimentado. Este tipo de desarenadores son los más comunes y su operación permite el lavado o retiro de sólidos decantados en menor duración para minimizar las pérdidas de agua debido a la operación.

En función de la velocidad de escurrimiento

- De baja velocidad: son desarenadores que tienen velocidades entre 0,20 a 0,60 m/s.
- De alta velocidad: son desarenadores que tienen velocidad entre 1 a 1,50 m/s.

Por la disposición de los desarenadores

- En serie: formado por dos o más naves construidos uno a continuación del otro.
- En paralelo: formado por dos o más naves distribuidos paralelamente y diseñados para una fracción de caudal derivado.

4.1.4. Dimensionamiento

Los desarenadores son diseñados para un diámetro de partícula determinado, esto nos quiere decir, que partículas con diámetros mayores van hacer decantados en las naves del desarenador.

El procedimiento para determinar las dimensiones desarenador se expresan a continuación:

- Determinar el diámetro de la partícula sólida en función de la altura de caída.
- Determinar la velocidad horizontal y de sedimentación, y el empuje ascensional.
- Calcular la longitud de la nave del desarenador.
- Estimar la profundidad de la nave del desarenador.
- Determinar el tiempo de desplazamiento y sedimentación de la partícula sólida.
- Determinar el ancho de la nave del desarenador.
- Determinar la longitud de la transición.
- Diseñar el vertedero.

4.2. Diseño hidráulico de la estructura de un desarenador

El diseño hidráulico del desarenador para una central hidroeléctrica se debe considerar:

- La dureza del metal de las turbinas.
- Sensibilidad a los desgastes, en el caso de las turbinas Pelton que son más resistentes que las turbinas Francis a la abrasividad de los sedimentos.
- La altura de caída, debido a que los materiales más finos caen desde grandes alturas provocando daños a las máquinas.

Tabla 4.1: Diámetro de partícula que un desarenador puede retener en función de la altura de caída de la central hidroeléctrica

Diámetro de las partículas que son retenidas en el desarenador (mm)	Altura de caída (m)
0,6	100 - 200
0,5	200 - 300
0,3	300 - 500
0,1	500 - 1000

- También se puede relacionar el diámetro de los sedimentos a eliminar con el tipo de turbina utilizado en la central hidroeléctrica, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 4.2: Diámetro de partícula a eliminar en función del tipo de turbina

Diámetro de partículas que son retenidas en el desarenador (mm)	Tipo de turbina
1,0 - 3,0	Kaplan
0,4 - 1,0	Francis
0,2 - 0,4	Pelton

4.2.1. Diseño hidráulico de la estructura de entrada

Parámetros de diseño

El objetivo del diseño hidráulico de las transiciones es reducir las pérdidas de energía al mínimo. Para lograr esto se debe tomar en cuenta las hipótesis siguientes del análisis hidráulico²¹:

- Los efectos de la curvatura de las líneas de corriente tienen que ser despreciables, la distribución de presiones es hidrostática y no deben ocurrir zonas de separación de contorno.

²¹ (Proaño, 2013)

- La velocidad varía en función de la distancia (variación unidireccional y los coeficientes α de Coriolis y β de Boussinesq se puede considerar iguales a la unidad en cada sección transversal.
- La gradiente de la línea de energía es constante a lo largo de la transición.

Dimensionamiento en planta de la transición

Transición recta: se diseña para una longitud de transición donde las pérdidas sean lo más mínima posible entre los tramos a unir.

La siguiente figura representa una vista en planta de una transición recta que une la nave del desarenador (izquierda) y el canal de acceso (derecha), donde T_1 , T_2 representa el espejo de agua y b_1 , b_2 los anchos de las estructuras a unir, mientras que el ángulo α es formado por los espejos de agua.

Figura 4.3: Vista en planta de una transición

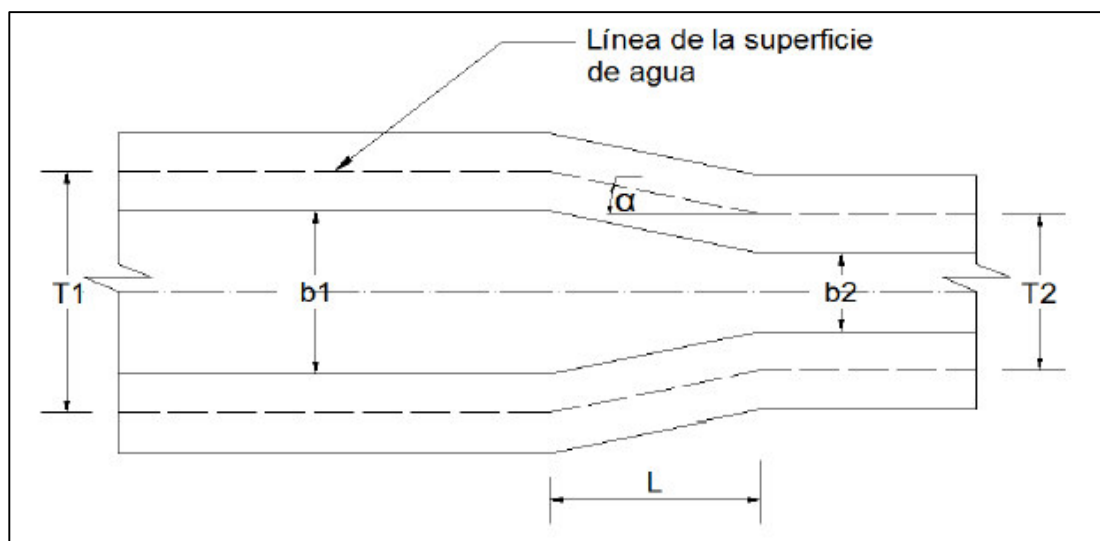
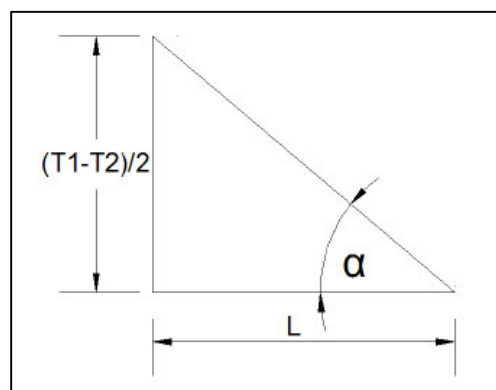


Figura 4.4: Diferencia de alturas entre espejos de agua



De la figura 4.4 se observar el triángulo donde podemos expresar la $\tan \alpha$ como:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{T_1 - T_2}{2}}{L} \quad (4.1)$$

$$L = \frac{T_1 - T_2}{2 \tan \alpha} \quad (4.2)$$

Donde, L es la longitud de la transición expresada en metros, T_1 y T_2 son los espejos de agua expresado en metros, α es el ángulo que forman los espejos de agua expresado en grados sexagesimales.

Según las experiencias de Julian Hinds, y según el Bureau of Reclamation para conseguir pérdidas de carga mínima el valor de α debe ser 12.5° y puede ser aumentado hasta 25° .

4.2.2. Diseño hidráulico de la cámara de desarenación

Determinación del diámetro de las partículas a sedimentar

Los desarenadores se diseñan para un determinado diámetro de partículas, significa que diámetros mayores al escogido deben depositarse.

En la siguiente tabla se puede determinar el diámetro del material que va a ser retenido en el desarenador en función de la altura de caída y el tipo de turbina de la central hidroeléctrica.

Tabla 4.3: Tamaño mínimo del material a ser retenido en el desarenador

Altura de caída		Tamaño máximo de partículas (mm)		
z (m)	Tamaño máximo de partículas (mm)	según tipo de turbina		
		Kaplan	Francis	Pelton
100 - 200	0,6 a 1,0	1,0 a 3,0	0,4 a 1,0	0,2 a 0,4
200 - 300	0,5 a 0,6	1,0 a 3,0	1,0 a 3,0	0,2 a 0,4
300 - 500	0,3 a 0,5	1,0 a 3,0	1,0 a 3,0	0,2 a 0,4
> 500	0,1 a 0,3	1,0 a 3,0	1,0 a 3,0	0,2 a 0,4

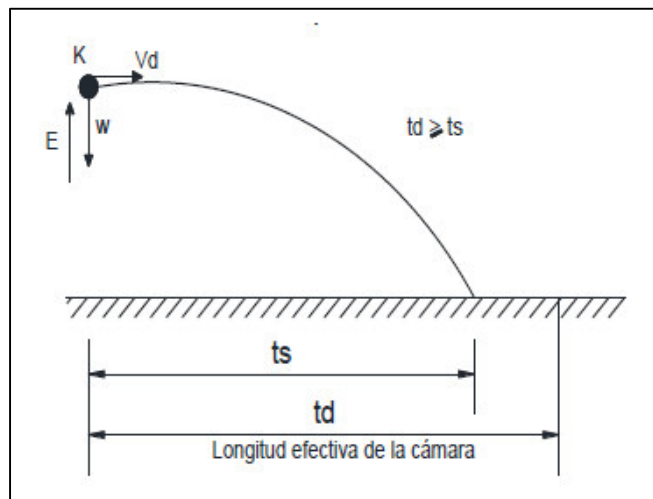
Cálculo de la velocidad horizontal

La trayectoria que desarrolla las partículas sólidas dentro de la cámara es un movimiento parabólico, tienen una componente horizontal constante de velocidad (V_d) y una componente vertical igual a la velocidad de sedimentación (w) de la partícula en un medio estático.

El principio fundamental es reducir la velocidad en la cámara y distribuirla uniformemente en toda la sección de la cámara.

El tiempo de sedimentación (t_s) debe ser menor al tiempo de desplazamiento del agua por la longitud de la cámara.

Figura 4.5: Esquema de la curvatura de un grano de arena “k”, depositándose bajo la influencia de la turbulencia



Donde, V_d es la velocidad horizontal de sedimentación, w es la velocidad vertical de sedimentación, E es el empuje ascensional dinámico que se debe a la turbulencia, t_s es el tiempo de sedimentación y t_d es el tiempo de desplazamiento.

La velocidad horizontal V_d debe ser lo más pequeña posible para que:

- Las partículas pueden depositarse.
- Las partículas depositadas no vuelven a ser arrastradas.
- Las partículas de descenso no sean puestas nuevamente en flotación.

$$V_d = a\sqrt{d} \quad (4.3)$$

Donde, V_d es la velocidad horizontal de sedimentación expresada en m/s, d es el diámetro granular expresado en mm y a es la constante en función del diámetro.

La velocidad horizontal de sedimentación está en función del diámetro de las partículas a ser retenidas.

Tabla 4.4: Valores de “a” en función del diámetro

Diámetro de la partícula (mm)	Valor del factor "a" según	
	Camp	R. S. Varshnev
> 1,0	0,36	0,55
0,1 a 1,0	0,44	0,66
< 0,1	0,51	0,77

Cálculo de la velocidad de caída de la partícula

Existen varias fórmulas empíricas, tablas y monogramas para el cálculo de la velocidad de caída de la partícula, de las cuales se tienen:

- Tabla preparada por Arkhangelski

La siguiente tabla nos permite calcular el valor de la velocidad de sedimentación (w) en función del diámetro de las partículas²².

²² (Sparrow, 2008)

Tabla 4.5: Velocidad de sedimentación w calculado por Arkhangelski (1985) en función del diámetro de partícula

d (mm)	w (cm/s)
0,05	0,178
0,10	0,692
0,15	1,56
0,20	2,16
0,25	2,70
0,30	3,24
0,35	3,78
0,40	4,32
0,45	4,86
0,50	5,40
0,55	5,94
0,60	6,48
0,70	7,32
0,80	8,07
1,00	9,44
2,00	15,29
3,00	19,25
5,00	24,90

- La fórmula de Owens

Estudió las caídas de las partículas en agua calma, desarrollando la siguiente fórmula:

$$w = k\sqrt{d(\rho_s - 1)} \quad (4.4)$$

Donde, w es la velocidad de sedimentación expresado en m/s, d es el diámetro de partículas expresada en m, ρ_s es el peso específico de partículas expresada en g/cm³ y k es la constante que está en función de la forma de los granos.

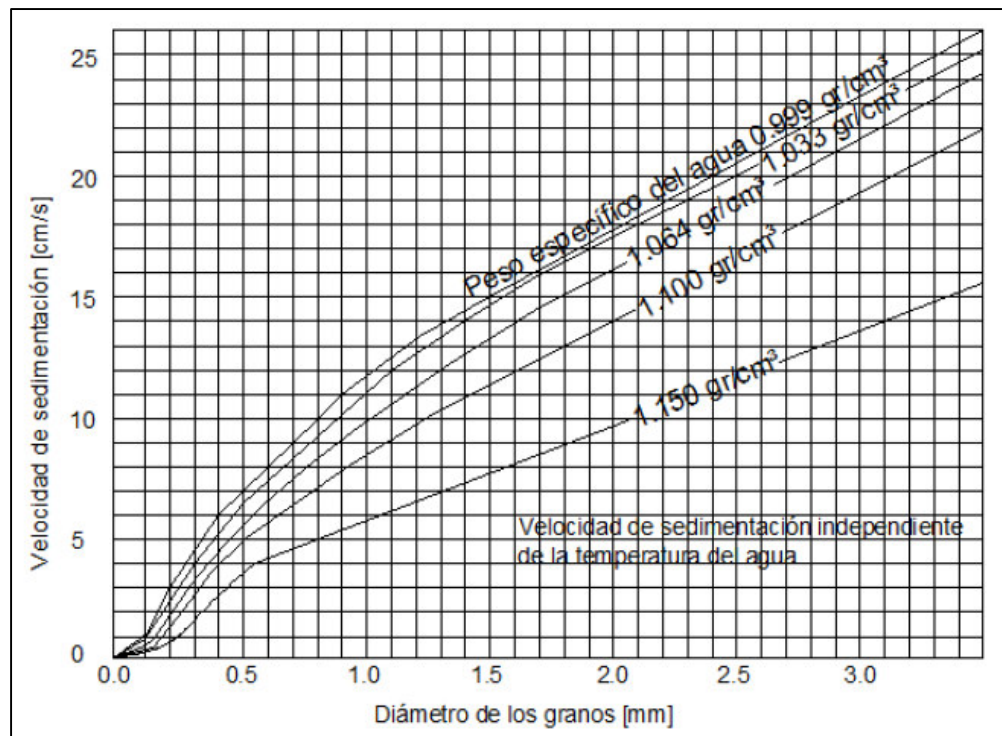
Tabla 4.6: Constante k para la fórmula de Owens

k	Forma de los granos
9,35	Esferas
8,25	Granos redondeados
6,12	Granos de cuarzo Diámetro > 3,0 mm
1,28	Granos de cuarzo Diámetro < 0,7 mm

- Experiencia obtenida por Sudry

Nos permite calcular la velocidad de sedimentación w (m/s) a partir del diámetro de la partícula (mm) y del peso específico del agua ρ_s (gr/cm³) en el monograma de la siguiente gráfica.

Gráfica 4.1: Velocidad de sedimentación de granos de arena en agua turbia según Sudry



- La fórmula de Scotti – Folglieni

Siguió el mismo procedimiento que Sudry utilizando un modelo de sifón auto elevador descargador de gasto sólido, obteniendo la siguiente fórmula.

$$w = 3,8\sqrt{d} + 8,3d \quad (4.5)$$

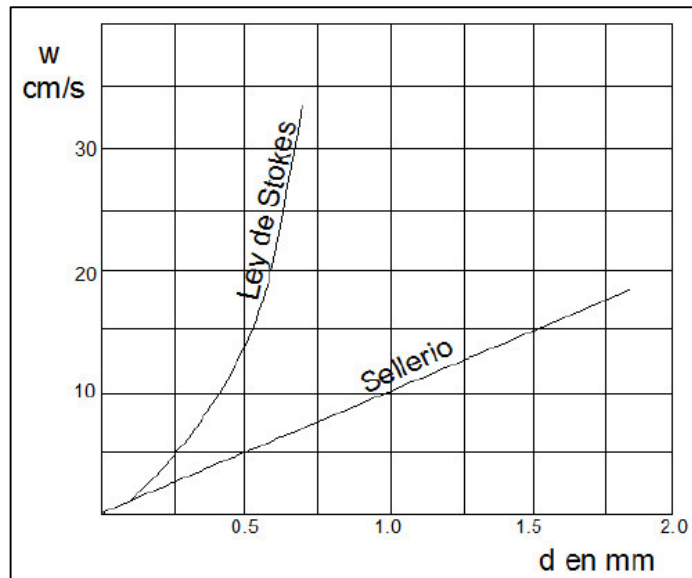
Donde, w es la velocidad de sedimentación expresada en m/s y d es el diámetro de la partícula expresada en m.

- Sellerio

De la experiencia con granos de arena en movimiento en el agua, obtuvo la siguiente figura, de las cuales nos permite calcular la velocidad de caída w

(m/s) a partir del diámetro de la partícula d (mm) para diámetros mayores a 0,1 mm.

Gráfica 4.2: Experiencia de Selerio



○ Krey

Desarrolló las siguientes fórmulas para granos en agua calma.

Para granos de diámetro de menor o igual a 2 mm.

$$d(\rho_s - 1) = 0,007w^{1,2} \quad (4.6)$$

Para diámetros mayores de 2 mm.

$$d(\rho_s - 1) = 0.00064w^2 \quad (4.7)$$

Donde, w es la velocidad de sedimentación expresada en m/s, d es el diámetro de la partícula expresada en m y ρ_s es el peso específico del material a sedimentar expresada en gr/cm³.

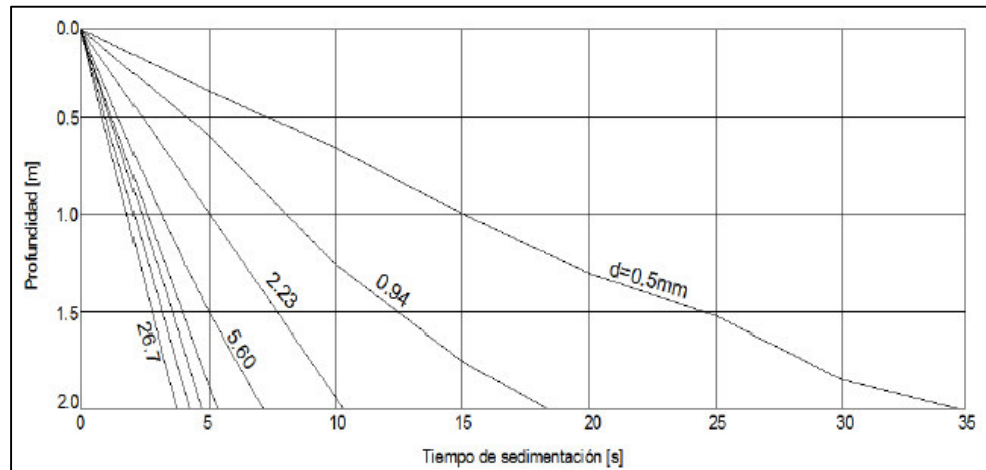
○ Bosterli

Con diferentes dimensiones de granos obtuvo la gráfica que relaciona los tiempos de caída con las velocidades de sedimentación, obteniendo la siguiente expresión:

$$w = 10\sqrt{d} \quad (4.8)$$

Donde, w es la velocidad de sedimentación expresada en m/s y d es el diámetro de la partícula expresada en m.

Gráfica 4.3: Tiempo de caída de gramos según experiencia de Bosterli



Elección del número de cámaras desarenadoras

En las centrales hidroeléctricas se asume el requerimiento de dos o más naves con el fin de evitar interrupciones en la generación de energía eléctrica, debido a los procesos de lavado de unas de las cámaras las demás se puedan utilizar sin interrumpir la generación.

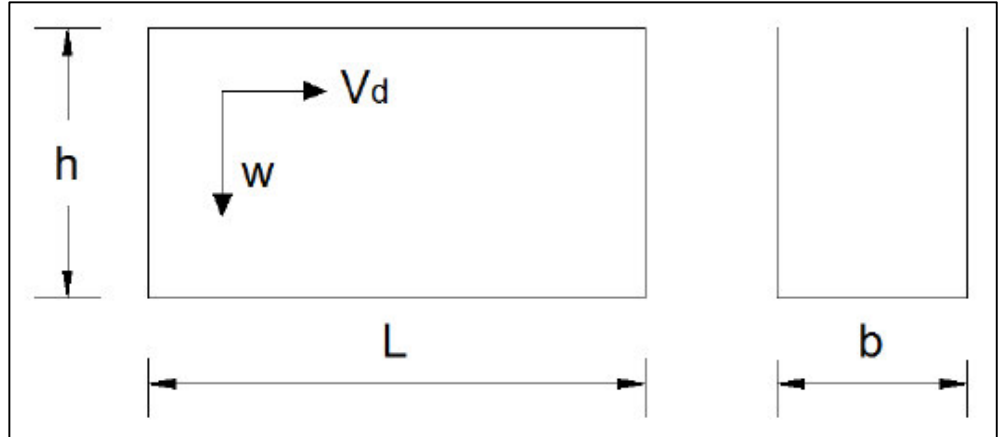
Fotografía 4.1: Desarenador de la Central Hidroeléctrica El Platanal (Yauyos – Perú), tiene un caudal de ingreso de 20 m³/s y 5 cámaras desarenadoras



Dimensionamiento de las cámaras desarenadoras

- Sin considerar los efectos retardatorios de la turbulencia en la velocidad de sedimentación.

Figura 4.6: Dimensionamiento y elevación de la cámara desarenadora



Donde, h es la altura de la cámara desarenadora, L es longitud de la cámara desarenadora, b es el ancho de la cámara desarenadora, V_d es la velocidad horizontal de sedimentación y w es la velocidad vertical de sedimentación.

- Caudal de diseño de cada cámara

El caudal que pasará por cada una de las cámaras será igual al caudal de diseño de entrada repartido entre el número de cámaras aumentado por un porcentaje del caudal de ingreso, debido a las operaciones de limpieza de una cámara las demás continuarán en sus funciones de sedimentación.

$$Q_{dc} = \frac{Q_{entrada}}{N} (1 + \%Purga) \quad (4.9)$$

Donde, Q_{dc} es el caudal de diseño de cada cámara, $Q_{entrada}$ es el caudal de entrada al desarenador, $\%Purga$ es el porcentaje que varía entre 5% a 10% del caudal de entrada y N es el número de cámaras.

$$Q_{dc} = bhV_d \quad (4.10)$$

$$b = \frac{Q_{dc}}{hV_d} \quad (4.11)$$

Tiempo de sedimentación:

$$w = \frac{h}{t_s} \quad (4.12)$$

$$t_s = \frac{h}{w} \quad (4.13)$$

Tiempo de desplazamiento:

$$V_d = \frac{L}{t_d} \quad (4.14)$$

$$t_d = \frac{L}{V_d} \quad (4.15)$$

En el criterio de tiempo se busca que:

$$t_s = t_d \quad (4.16)$$

$$\frac{h}{w} = \frac{L}{V_d} \quad (4.17)$$

Obtenemos la longitud aplicando la teoría de simple sedimentación:

$$L = \frac{hV_d}{w} \quad (4.18)$$

- Considerando los efectos del flujo turbulento

En el flujo de agua la velocidad de sedimentación se reduce en $w-w'$, donde w' es la reducción de la velocidad por efectos del flujo turbulento.

La ecuación se define:

$$L = \frac{hV_d}{w - w'} \quad (4.19)$$

Con esta ecuación vamos a obtener valores de longitud mayor que con la ecuación anterior.

Diferentes autores han determinado la disminución de la velocidad por efectos de la turbulencia mediante la experiencia en laboratorios y trabajos de investigación.

Velikanov, Bestelli

$$w' = \alpha V_d \quad (4.20)$$

$$\alpha = \frac{0,123}{\sqrt{h}} \quad (4.21)$$

$$w' = \frac{0,123V_d}{\sqrt{h}} \quad (4.22)$$

Eguiazaroff

$$w' = \frac{V_d}{5,7 - 2,3h} \quad (4.23)$$

Sokolov

$$w' = 0,152w \quad (4.24)$$

Gubin

$$w' = \frac{V_d}{6,6h^{0,77}} \quad (4.25)$$

En el cálculo de los desarenadores de bajas velocidades se puede realizar una corrección, mediante el coeficiente k que depende de la velocidad de escurrimiento dentro de la cámara.

$$L_c = k \frac{hV_d}{w - w'} \quad (4.26)$$

El valor de k se determina de la siguiente tabla.

Tabla 4.7: Constante k para el cálculo de desarenadores de baja velocidad

Velocidad de escurrimiento (m/s)	k
0,2	1,25
0,3	1,50
0,5	2,00

De la misma manera se hace la corrección para desarenadores de altas velocidades mediante de la siguiente tabla.

Tabla 4.8: Constante k para el cálculo de desarenadores de alta velocidad

Dimensiones de la partícula a eliminar (mm)	k
1,00	1,00
0,50	1,30
0,25 - 0,30	2,00

- Proceso de cálculo de las dimensiones de la cámara desarenadora

Se debe de tener en cuenta el volumen de agua que ingresa al desarenador y el volumen de la geometría del desarenador para describir el criterio de volúmenes.

$$V_{agua} = Q \times t_s \quad (4.27)$$

$$V_g = L \times b \times h \quad (4.28)$$

Donde, V_{agua} es el volumen de agua que ingresa al desarenador, V_g es el volumen de la geometría del desarenador, Q es el caudal que ingresa al desarenador, t_s es el tiempo de sedimentación, L es la longitud de la cámara del desarenador, b es el ancho de la cámara del desarenador y h es la altura de la cámara del desarenador.

Para el dimensionamiento de la cámara del desarenador debemos tener en cuenta la siguiente expresión:

$$V_g \geq V_{agua} \quad (4.29)$$

4.2.3. Diseño hidráulico de las estructuras de limpieza

Para facilitar la limpieza del fondo del desarenador la pendiente media que se puede elegir para el fondo en la dirección de las compuertas es de 1:20; y la pendiente transversal en dirección a la línea baja que se determina en el fondo de cada parte del depósito, de 1:7²³, también se puede diseñar una doble pendiente longitudinal cuando se trata de longitudes de desarenador muy grandes para evitar la profundización de las tolvas, estas tolvas deben tener una pendiente suficiente para arrastrar todos los materiales acumulados en el fondo.

$$\Delta z = L \times S_0 \quad (4.30)$$

$$H = h + \Delta z \quad (4.31)$$

Donde, Δz es la diferencia de cotas del fondo del desarenador, L es la longitud de las cámaras desarenadoras, S_0 es la pendiente de fondo de cada cámara, H es la profundidad del desarenador frente a la compuerta de lavado y h es la profundidad de diseño del desarenador.

Compuerta de lavado

Las compuertas de lavado son utilizadas en el momento de la purga de los materiales sedimentados a la hora de menor demanda de energía eléctrica, estas deben ser diseñadas para el caudal que ingresa al desarenador más el caudal a utilizar para el lavado de las cámaras del desarenador.

$$Q_v = Q_{dc} + Q_l \quad (4.32)$$

$$Q_l = \frac{V_c}{t_l} \quad (4.33)$$

Donde, Q_v es el caudal de vaciado, Q_{dc} es el caudal de diseño de cada cámara, Q_l es el caudal de lavado, V_c es el volumen de cada cámara y t_s es el tiempo de lavado.

²³ (Gómez, 1932)

Cálculo del área de las compuertas de lavado

$$Q_v = C_d A_0 \sqrt{2gh_c} \quad (4.34)$$

Donde Q_v es el caudal de vaciado, C_d es el coeficiente de descarga (igual a 0,6), A_0 es el área de la compuerta, h_c es la carga sobre la compuerta igual a la altura H más la altura de la tolva y g es la aceleración de la gravedad.

Cálculo de la velocidad de salida

$$V = \frac{Q_v}{A_0} \quad (4.35)$$

Donde, V es la velocidad de salida por la compuerta (entre 3 a 5 m/s), Q_v es el caudal vaciado y A_0 es el área de la compuerta.

4.3. El desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

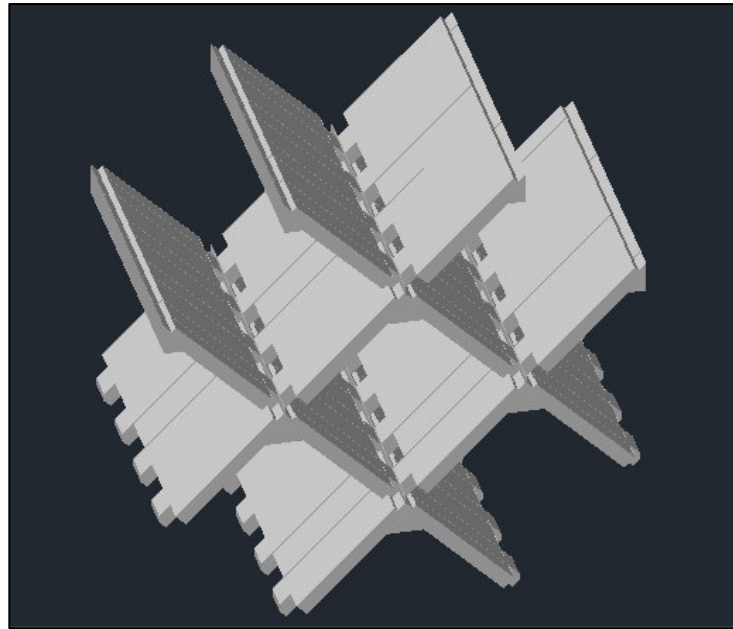
El desarenador de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato es una concepción francesa diseñada para un caudal de 48 m³/s conformada por cuatro naves, dos naves centrales de longitud de 31 m y dos naves laterales con longitud 36 m debido a los tramos en curva que tienen en la entrada y la salida, mientras que las naves centrales son rectas y de menor longitud.

En las cuatro naves existen un sistema de elementos tabicados de desarenamiento, tienen un ancho de 6,40 m y la longitud de la parte tabicada es de 31 m en las naves centrales y 36 m en las naves laterales.

El tabicado está constituido por elementos prefabricados de concreto, las cuales son diedros de 90° de 2 m de longitud, 1,05 y 1,12 m de ancho de ala y de 0,70 m a 0,10 m de espesor. En los bordes de las alas se encuentran los orificios de 0,30 m de longitud por 0,10 m de altura, destinado a dejar escurrir los sedimentos. Las dimensiones del desarenador están indicados en los planos N°07 – I, N°07 – II, N°10 – I y N°10 – II en el Anexo del presente trabajo.

Los elementos tabicados limitan la altura de caída libre de las partículas sólidas en suspensión a un máximo de 1,25 m²⁴.

Figura 4.7: Vista isométrica de un elemento tabicado del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



El desarenador cuenta con una tabiquería en todo el ancho y longitud de las naves debido a que la estructura se encuentra construida en caverna y las longitudes de las naves no son suficientes para cumplir con su objetivo.

En la parte inferior de cada nave se encuentra la galería de evacuación que recorre toda la longitud de la nave para luego llegar a la galería principal de evacuación.

El sistema de purga del desarenador es intermitente, conformado por orificios de purgas constituido de válvulas regulables que descargan los sedimentos desde las naves tabicadas hacia la galería de evacuación. Las naves laterales cuentan con 42 válvulas de purga, mientras que las centrales con 40 y entran en funcionamiento cuando son accionadas desde un tablero eléctrico que se encuentra en la misma galería²⁵.

²⁴ (Electroperu S.A., 1985)

²⁵ (Valdivia, 1996)

4.3.1. Factores que causan la variación de la orientación del flujo en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

La reducción de área en el ingreso a cada nave debido a la presencia de la tabiquería que vistas desde un corte transversal forma un panal de abeja, siendo el área que ocupa la tabiquería en cada nave de 11,46 m², mientras que el área de cada nave es de 71,68 m².

La formación de corrientes adicionales, generadas por la decantación del agua y sedimento por las ranuras de conexión de la tabiquería.

Generación de corrientes ascendentes y descendentes, ocasionado por las variaciones en los niveles de agua debido al mal funcionamiento del sistema de purga.

La mala maniobra de las compuertas de captación, origina un aumento de caudal que no puede ser evacuado por el primer pique, de las cuales las aguas chocan en las paredes del pique y generaran ondas de reflexión que se propaga por toda la longitud de las naves²⁶.

El ensanchamiento brusco entre la sección de la galería de aducción y la sección de ingreso, tienen una transición de longitud muy pequeña que las une, de las cuales provoca una mala distribución de las velocidades en las naves tabicadas del desarenador.

La forma de las naves centrales es distinta de las naves laterales, mientras las primeras se encuentran en el eje longitudinal del túnel que une la compuerta de toma y la gran cámara desarenadora, que generan un flujo relativamente uniforme, por el contrario las naves laterales son de forma curva y de mayor longitud que produce fenómenos de resistencia al flujo, generando menores velocidades que en las naves centrales²⁷.

²⁶ (Valdivia, 1996)

²⁷ (Electroperu S.A., 1985)

4.3.2. Problemas de decantación de sólidos en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

El problema de desarenación es de importancia para la operación de la central hidroeléctrica, y el desarenador no ha cumplido a cabalidad con su objetivo, convirtiéndose en uno de los factores limitantes en el total aprovechamiento de la central hidroeléctrica.

Factores que influyen en la eficiencia del desarenador

Los factores que influyen en la eficiencia del desarenador tienen origen en el propio proyecto, los más importantes son²⁸:

- Desconocimiento de la granulometría de los sedimentos

Se tomaron dos muestras a 100 m aguas arriba de la presa, mientras que los autores del proyecto consideraron la granulometría definida como una referencia para el diseño del desarenador, de las cuales se ha comprobado que sólidos muy finos han sobrepasado las aguas del desarenador sin depositarse.

El desarenador fue proyectado para decantar partículas mayores a 0,20 mm de diámetro con una velocidad de flujo en cada nave de 0,30 m/s, bajo estas consideraciones el desarenador trabaja de forma aceptable, pero se debe tener en cuenta que el porcentaje de finos con diámetros menores a 0,20 mm es bastante considerado, además el desgaste de las turbinas no será totalmente suprimido debido al paso de los limos que escapa a la acción de cualquier tipo de desarenador, pero el efecto de estos finos quedará en límites aceptable para este tipo de instalaciones.

- Geometría del desarenador

Este factor incide en la entrada y la salida del flujo en la estructura del desarenador provocando una distribución no uniforme de las corrientes.

²⁸ (Electroperu S.A., 1985)

En la entrada se ve influenciada por la transición corta y abrupta que provoca la concentración de flujo en las naves centrales que en las laterales.

Mientras que en la salida, la velocidad de las naves centrales no enfrenta perpendicularmente al vertedero generando dos componentes de velocidad, una perpendicular y otra paralela con relación al paramento del vertedero, siendo que esta última interfiera en el escurrimiento del flujo de aguas de las naves laterales.

- Deficiente estado de conservación y operación del sistema de purga

La teoría de tabicado en los desarenadores comprende la simultaneidad de los procesos de decantación y evacuación de los sólidos decantados, mediante purga continua, pero esto no sucede provocando la colmatación de las alas inferiores de los tabiques.

Además el caudal utilizado para la purga es mayor al proyectado, se debe tener en cuenta que solo se cuenta con 164 válvulas.

Fotografía 4.2: Ingreso a las naves del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



5. CARACTERISTICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RIO SANTA

5.1. Tamaño de sedimentos

El tamaño es una propiedad medible y una de las más importantes de los sedimentos, esta propiedad se puede determinar a partir otras propiedades características de las partículas de sedimentos en estudio.

Para cuantificar el tamaño de las partículas de los sedimentos de forma directa se utiliza mallas o tamices, mientras de forma indirecta mediante el uso de procesos ópticos, fotográficos y de sedimentación. Esta propiedad, se vuelve más representativa cuando cuantifica la distribución de los tamaños en las muestra de fondo de los lechos del río o de una infraestructura hidráulica.

Debido a la variación de tamaños de los sedimentos estas se clasifican en función del análisis de muestra. Para las gravas y arenas muy fina que comprende las dimensiones de 3" o 4" hasta los 0,62 mm se recurre al método del tamizado de mallas, para partículas más pequeñas se utiliza el hidrómetro. A continuación, se presenta la tabla para el tamizado de las series de Tyler Standard y del US Bureau of Standards, ambas series presentan aberturas cuadradas y dimensiones entre 3" y 0,038 mm y entre 4" y 0,037 mm respectivamente.

Tabla 5.1: Serie de tamices Tyler Estándar y US Bureau of Standards

Tyler Estándar			US Bureau of Standards		
Malla	Abertura		Número	Abertura	
	Pulgadas	mm		Pulgadas	mm
	3,00	76,2		4,00	101,60
	2,00	50,4		2,00	50,80
	1,05	26,67		1,00	25,40
	0,742	18,85		0,75	19,10
	0,525	13,33		0,50	12,70
	0,371	9,423		0,375	9,52
3	0,263	6,68	3	0,25	6,35
4	0,185	4,699	4	0,187	4,76
6	0,131	3,327	6	0,132	3,36
8	0,093	2,362	8	0,0937	2,38
9	0,078	1,981	10	0,0787	2,00
10	0,065	1,651	12	0,0661	1,68
14	0,046	1,168	16	0,0469	1,19
20	0,0328	0,833	20	0,0331	0,84
28	0,0232	0,569	30	0,0232	0,59
35	0,0164	0,417	40	0,0165	0,42
48	0,0116	0,295	50	0,0117	0,297
60	0,0097	0,246	60	0,0098	0,25
65	0,0082	0,208	70	0,0083	0,21
100	0,0058	0,147	100	0,0059	0,149
150	0,0041	0,104	140	0,0041	0,105
200	0,0029	0,074	200	0,0029	0,074
270	0,0021	0,053	270	0,0021	0,053
400	0,0015	0,038	400	0,0015	0,037

El método del hidrómetro se basa en la aplicación de la ecuación de Stokes, debido a que el tamaño de partícula representa el diámetro de una esfera que cae a una determinada velocidad en agua sin movimiento. Este método permite determinar el tamaño del límite de los limos y también de los diámetros menores a las dimensiones de las arcillas que tienen forma de plato. Para determinar el tamaño de las partículas que se presentan en los lechos de los ríos como los cantos rodados y piedras con dimensiones mayores a 3” se recurre al conteo para completar la descripción granulométrica²⁹.

En conclusión, para determinar el tamaño de elementos gruesos como piedras y cantos se recurre al conteo, para las gravas y arenas por tamizado, mientras que para los limos y arcillas mediante el método del hidrómetro. En la siguiente tabla se

²⁹ (Proaño, 2013)

muestra la clasificación de los sedimentos en base a un rango de tamaños de amplia aceptación preparada por La Unión Americana de Geofísica.

Tabla 5.2: Escala de graduación de sedimentos, American Geophysical Union Agua (1947)

Clasificación	Rango de tamaños (mm)	
Canto rodado muy grande	4000 - 2000	
Canto rodado grande	2000 - 1000	
Canto rodado mediano	1000 - 500	
Canto rodado pequeño	500 - 250	
Guijarro grande	250 - 150	
Guijarro pequeño	130 - 64	
Grava muy gruesa	64 - 32	
Grava gruesa	32 - 16	
Grava mediana	16 - 8	
Grava fina	8 - 4	
Grava muy fina	4 - 2	
Arena muy gruesa	2,000 - 1,000	2 - 1
Arena gruesa	1,000 - 0,500	1 - 1/2
Arena mediana	0,500 - 0,250	1/2 - 1/4
Arena fina	0,250 - 0,125	1/4 - 1/8
Arena muy fina	0,125 - 0,062	1/8 - 1/16
Limo gruesa	0,062 - 0,031	1/16 - 1/32
Limo mediana	0,031 - 0,016	1/32 - 1/64
Limo fina	0,016 - 0,008	1/64 - 1/128
Limo muy fina	0,008 - 0,004	1/128 - 1/256
Arcilla gruesa	0,0040 - 0,0020	1/256 - 1/512
Arcilla mediana	0,0020 - 0,0010	1/512 - 1/1024
Arcilla fina	0,0010 - 0,0005	1/1024 - 1/2048
Arcilla muy fina	0,0005 - 0,00024	1/2048 - 1/4096

5.2. Composición mineralógica

La composición mineralógica de los sedimentos es de suma importancia, porque la velocidad de decantación y la eficacia de la limpia de los desarenadores depende de ellas, ya sea por su forma o por su peso específico, así como el potencial de dañar los elementos electromecánicos por abrasión de una central hidroeléctrica; como las turbinas, asientos, inyectores, etc.

Los sedimentos definen su composición mineralógica debido a que se originan de la desintegración de las rocas, así las rocas y las gravas corresponden a fragmentos de

roca original, la arena mayoritariamente del cuarzo y el limo de las arcillas de los feldespatos y micas.

Para los proyectos, operación y mantenimiento de los desarenadores, la principal fracción de sedimentos son las arenas, en ellas se encuentra la predominancia de sílice, aluminio, óxido de hierro, calcio, magnesio junto a silicatos como feldespatos, micas y sales de carbón que dependen de la composición original de las rocas y la duración y forma de transporte.

Las superficies de los sedimentos se pueden mostrar de diferentes maneras, como superficies pulidas debido al continuo transporte que sufren, contrariamente a las superficies angulosas, mientras que las superficies con cavidades es por la acción de la descarga de cursos de agua a gran velocidad y las superficies rugosas resultan de la acción del agua y sus sales sobre la composición mineralógica del sedimento.

5.3. Forma de sedimentos

Se refiere a la forma geométrica de los sedimentos y no de su composición mineralógica. Los sedimentos de diferente forma, pero de la misma densidad y mismo volumen pueden conducirse de la misma manera en los líquidos que están en movimiento, de esto podemos concluir que la forma de las partículas se encuentra relacionada con el comportamiento hidromecánico de estas.

- Esfericidad

Parámetro adimensional que guarda relación entre el fluido y la partícula sumergida en el, se define como la relación del área superficial de una esfera que tiene el mismo volumen y área.

La esfericidad depende fundamentalmente de la composición mineral del sedimento.

- Redondez

Es un parámetro adimensional que tiene mucha aplicación en el estudio de abrasión, pero es muy poco utilizado en el estudio del comportamiento hidráulico de los sedimentos³⁰.

5.4. Concentración de sólidos

Es la cantidad de partículas que se encuentra en el seno de un líquido, se calcula comparando volúmenes (concentración en volumen) o pesos (concentración en peso). En la hidráulica fluvial se considera que las partículas de sedimentos en suspensión no incluyen materias vegetales ni sólidos disueltos y para separar las partículas de sedimento de la muestra, estas deben decantarse o filtrarse pero no evaporarse.

- Concentración en peso: relaciona el peso seco de los sedimentos con el volumen total de la muestra.
- Concentración en volumen: relaciona el volumen de los sólidos que hay en la muestra y el volumen total de la misma.

5.5. Transporte de sedimentos en la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato³¹

5.5.1. Transporte de sedimentos

Transporte de sólidos de fondo del río Santa

El transporte de los sólidos de fondo en épocas de avenida se encuentra en el orden de 60% a 80% de total anual y en el periodo de estiaje se encuentra en el rango de 20% a 40%. La relación entre el periodo de avenida y estiaje se puede estimar de forma general como 3:1.

³⁰ (Carrión, 2004)

³¹ (Electroperu S.A., 1985)

Transporte de sólidos en suspensión en el río Santa

El transporte de sólidos en suspensión en el río Santa se encuentra en un rango de 4 a 6 millones de toneladas al año. El transporte en avenidas representa el 90% del total anual mientras que en estiaje solo un 10%, se encuentran en una relación de 9:1.

Transporte de sólidos en suspensión en la Bocatoma

La cantidad de sólidos transportados entre la estación La Balsa y Bocatoma son casi iguales, ellas distan de un tramo de 2 Km, debido a que el aporte de material sólido del río Los Cedros es prácticamente nula. Comprobado por ELECTROPERU en 1975, encontraron concentraciones similares en ambos lugares. La concentración media en Bocatoma es de 1.3913 gr/l.

Sólidos en suspensión en el desarenador

Es evidente que la concentración de sólidos en suspensión es alta en los periodos de avenida comprendida entre Enero y Abril, e incluso en los meses de Diciembre y Mayo. Mientras que la variación de concentración en el periodo de estiaje de Junio a Noviembre es insignificante o nula.

La concentración promedio de las cuatro naves del desarenador, periodo de Marzo a Abril, en la entrada es de 1,0617 gr/l y en la salida es de 0,9011 gr/l.

Las concentraciones mayores se presentan en las naves laterales del desarenador debido a que ofrecen una mayor resistencia al escurrimiento del flujo por efecto a la curvatura que presenta, esto genera una cierta vorticidad de flujo manteniendo una mayor proporción de sólidos en suspensión que en las naves centrales.

Recolección de información de caudales y concentración de sedimentos

La empresa administradora de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato encargada de la operación y mantenimiento, mediante su política de recolección de datos que permita cuantificar su producción eléctrica generó un informe, llamado Informe Hidrológico, en donde se detalla los caudales en la bocatoma y los que son turbinados, además se recopila información de concentración de sólidos en

suspensión de los caudales que ingresan a la bocatoma y en Casa Fuerza, donde el operador realiza cuatro mediciones diarias, estas son, a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00.

Tabla 5.3: Caudales medios (m³/s) medidos en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

	Caudales medios (m ³ /s) - Bocatoma											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2003	148,46	151,58	247,65	134,51	55,22	34,71	31,91	33,48	35,27	48,28	49,62	101,33
2004	73,89	108,30	83,25	77,84	42,87	31,81	25,53	26,74	24,40	53,58	90,03	98,88
2005	100,60	106,72	154,41	91,37	50,55	38,54	34,40	33,03	36,34	45,91	51,75	94,76
2006	81,92	122,57	234,34	270,65	50,59	38,40	31,39	30,16	33,56	42,51	60,46	123,30
2007	137,71	117,20	290,48	243,76	71,88	37,01	28,77	30,03	28,08	42,07	61,95	63,98
2008	151,66	191,68	200,86	149,32	54,96	33,92	29,70	24,18	24,33	51,25	65,06	65,15
2009	160,17	308,73	407,68	339,94	88,61	43,82	29,45	30,60	34,61	54,61	96,47	218,80
2010	179,54	171,33	175,52	137,00	68,25	37,72	33,77	34,38	31,97	41,37	65,95	211,17
2011	291,83	164,70	147,75	186,21	62,12	37,94	31,06	28,35	25,95	30,02	58,57	126,61
2012	140,91	228,09	157,98	170,60	75,58	35,54	28,77	27,46	29,17	38,95	74,81	88,64
2013	97,42	130,09	267,32	107,68	54,90	30,77	24,55	26,19	29,27	53,01	55,66	101,97
2014	100,38	176,51	262,50	95,52	85,00	39,72	27,03	25,08	26,96	37,91	56,26	95,17
2015	155,44	141,46	186,81	130,79	89,26	41,95	28,82	30,23	33,78	47,07	60,47	85,93
2016	85,49	150,15	175,90	108,19	54,77	37,27	30,87	34,47	41,37	41,36	-	-

Tabla 5.4: Caudales medios (m³/s) medidos en Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

	Caudales medios (m ³ /s) - Turbinado											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2003	27,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67,88
2004	-	-	-	-	38,21	29,65	-	-	-	-	64,89	64,52
2005	66,60	69,05	67,32	67,82	47,97	38,08	34,14	32,57	36,24	45,32	51,15	61,55
2006	63,36	70,04	64,81	58,00	48,16	37,82	30,61	29,50	33,08	41,72	56,77	63,84
2007	61,20	68,38	70,50	68,27	58,87	36,57	27,72	29,45	27,17	42,56	59,45	58,74
2008	67,77	70,88	70,99	71,77	49,19	32,38	29,06	23,73	23,88	47,41	58,15	57,48
2009	66,94	59,42	55,24	54,54	52,70	39,37	28,49	29,16	33,83	50,75	59,23	66,71
2010	69,24	64,11	66,28	64,54	56,70	36,37	32,29	32,30	31,69	39,96	52,32	63,84
2011	65,44	62,90	60,66	59,18	48,04	32,46	25,82	26,77	23,92	27,98	49,19	57,92
2012	62,19	59,61	63,92	64,17	58,58	-	27,18	26,59	27,89	38,06	62,97	57,00
2013	61,93	60,52	52,90	59,68	49,04	29,58	24,16	24,92	28,06	46,47	52,34	59,81
2014	61,08	58,85	56,51	57,85	59,38	36,66	25,01	23,40	24,53	36,71	51,95	66,77
2015	67,68	69,74	64,80	64,92	67,19	39,46	27,82	28,99	32,63	45,07	57,30	69,49
2016	73,02	71,37	70,83	70,52	53,11	36,35	28,55	31,63	38,61	38,70	-	-

Tabla 5.5: Concentración media (gr/l) de los caudales captados en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

	Concentración media (gr/l) - Bocatoma											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2003	0,7775	1,1334	1,6085	0,5391	0,1025	0,0380	0,0344	0,0287	0,0323	0,1088	0,0930	0,7034
2004	0,1056	0,8012	0,4020	0,3643	0,0342	0,0197	0,0212	0,0209	0,0508	0,3112	0,8112	0,5830
2005	0,3345	0,3884	1,0152	0,4331	0,0495	0,0611	0,0477	0,0491	0,0626	0,1227	0,0750	0,2866
2006	0,2794	1,0803	2,8108	4,1151	0,0746	0,0995	0,0370	0,0376	0,0388	0,1681	0,1825	0,8668
2007	0,6358	0,6636	2,3442	2,0185	0,1425	0,0383	0,0426	0,0510	0,0629	0,1565	0,1740	0,1482
2008	0,7222	0,9632	0,8277	0,6048	0,0645	0,0567	0,0767	0,0549	0,0642	0,2533	0,1663	0,1420
2009	0,5415	2,0069	2,7044	2,1941	0,1555	0,0780	0,0726	0,0813	0,0817	0,3722	0,6195	1,2705
2010	0,6339	0,6669	0,7964	1,0489	0,2265	0,0897	0,0675	0,0816	0,0794	0,1953	0,2352	0,6080
2011	0,4058	0,3786	0,3600	0,9855	0,1581	0,0794	0,0879	0,1099	0,0890	0,0886	0,2386	0,6236
2012	0,3688	3,6598	1,1860	1,2593	0,1992	0,0807	0,0610	0,0727	0,1002	0,1476	0,2902	0,2773
2013	0,1691	0,2942	2,3994	0,3172	0,0849	0,0643	0,0664	0,0526	0,0535	0,1653	0,0853	0,2978
2014	0,2470	0,8581	1,7767	0,2017	0,2373	0,0665	0,0693	0,0606	0,0888	0,0849	0,1201	0,3694
2015	0,4983	0,6422	0,9501	0,2508	0,2158	0,0684	0,0560	0,0673	0,0887	0,1170	0,1481	0,3107
2016	0,1550	0,7465	0,6408	0,4086	0,0731	0,1066	0,0728	0,0873	0,0964	0,1844	-	-

Tabla 5.6: Concentración media (gr/l) medidos en Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

	Concentración media (gr/l) - Turbinado											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2003	0,5445	0,7486	1,1149	0,3642	0,0632	0,0210	0,0272	0,0185	0,0193	0,0639	0,0574	0,5007
2004	0,0684	0,5506	0,2997	0,2743	0,0235	0,0143	0,0123	0,0140	0,0386	0,2245	0,6168	0,4391
2005	0,2488	0,2858	0,7608	0,2942	0,0397	0,0441	0,0354	0,0349	0,0469	0,0853	0,0554	0,2134
2006	0,2111	0,7374	2,0942	2,8811	0,0547	0,0659	0,0275	0,0220	0,0288	0,1182	0,1308	0,6230
2007	0,4632	0,4680	1,6601	1,4092	0,1033	0,0273	0,0299	0,0355	0,0443	0,1106	0,1226	0,1099
2008	0,5102	0,6780	0,6065	0,4268	0,0467	0,0399	0,0365	0,0384	0,0452	0,1732	0,1183	0,1005
2009	0,3945	1,4248	1,9083	1,5539	0,1078	0,0574	0,0514	0,0653	0,0600	0,2631	0,4542	0,9237
2010	0,4659	0,4714	0,5698	0,7356	0,1617	0,0628	0,0494	0,0582	0,0574	0,1389	0,1696	0,4188
2011	0,2888	0,2712	0,2533	0,7097	0,1118	0,0579	0,0620	0,0792	0,0624	0,0637	0,1672	0,4425
2012	0,2592	2,0790	0,8657	0,8824	0,1423	0,0568	0,0432	0,0503	0,0683	0,1048	0,2077	0,2045
2013	0,1215	0,2170	1,6865	0,2255	0,0609	0,0463	0,0467	0,0375	0,0376	0,1178	0,0603	0,2130
2014	0,1765	0,6134	1,2764	0,1411	0,1672	0,0465	0,0459	0,0424	0,0631	0,0600	0,0841	0,2604
2015	0,3537	0,4490	0,6679	0,1786	0,1515	0,0479	0,0398	0,0479	0,0623	0,0823	0,1044	0,2274
2016	0,1093	0,5316	0,4628	0,3002	0,0510	0,0771	0,0516	0,0617	0,0676	0,1319	-	-

5.5.2. Granulometría de los sedimentos

Granulometría de los sólidos de fondo del río Santa

El material fue analizado por el método del tamizado, está constituido por material grueso en un 73% y de gama de arenas en 27%; el material mayor a 2 pulgadas se encuentra en 7,5%, mientras que las gravas finas y medias en 31,5% y la grava gruesa en 35%. La relación entre el material fino, las arenas, y el material grueso, las gravas, es de 1:2,5, además el diámetro efectivo del material de fondo es de 14,37 mm.

El coeficiente de uniformidad de es 38, nos quiere decir que el material de fondo transportado por el río Santa se compone de fracciones bien definidas, es decir el material fino y el material grueso.

Granulometría de los sólidos en suspensión en el río Santa

El material predominante es el limo que representa un 58%, mientras que la porción de arenas se encuentra en 47%. El material en suspensión es menor a 1 mm, el diámetro efectivo es de 0,12 mm y el coeficiente de uniformidad varía entre 2 y 4, lo que indica que la relación entre arena fina y limo es prácticamente 1:1.

Granulometría de los sólidos en suspensión en la Bocatoma

El material analizado se obtuvo de las rejillas de la toma de agua, donde se obtuvo el diámetro efectivo igual a 0,11 mm y un coeficiente de uniformidad de 27.

Granulometría de los sólidos en suspensión en relación a la concentración de la Bocatoma

Entre la gama de las arenas transportadas por el río Santa, las arenas finas son las que tienen mayor concentración. Esto es importante debido a que la mayor proporción de material a hacer sedimentado dentro de un desarenador son las arenas finas y para lograr decantar estas partículas significa reducir la concentración a la salida del desarenador.

El material limoso es mayor que la suma de las arenas y tiene la más alta concentración de sólidos en suspensión en la bocatoma. En la actualidad, es imposible eliminar, por medios mecánicos, el material limoso de un desarenador.

Granulometría de los sólidos en suspensión en el desarenador

Los estudios realizados determinaron la variación porcentual de los sólidos correspondientes a la arena fina, arena muy fina y los limos. A la entrada del desarenador, las arenas finas se encuentran en un porcentaje de 5% y 10%, las arenas muy finas en 6% y 16%, el material limoso en 28% y 31% y el material mayor a 0,15 mm de diámetro en 6% y 20%. Mientras que en la salida, las arenas finas se encuentran en 1% y 4%, las arenas muy finas 5% y 6%, el material limoso en 29% y 39% y las arenas mayores a 0,15 mm de diámetro en 1% y 2%.

Los materiales eliminados por el desarenador son las arenas finas en 5% y las arenas muy finas en 6%, las arenas mayores a 0,15 mm de diámetro en 12% y las arenas comprendidas entre 0,05 mm y 0,15 mm de diámetro en 21%, mientras que los limos y las arcillas no son eliminados.

Los diámetros efectivos en la entrada del desarenador es 0,045 mm y a la salida 0,016 mm, se aprecia que el material promedio que ingresa al desarenador es arena muy fina.

El desarenador logra decantar arenas mayores a 0,125 mm en una proporción significativa.

- Granulometría de los sólidos en suspensión en el desarenador en función de la concentración

La concentración aumenta a medida que el tamaño de las arenas disminuye. Las concentraciones más altas están comprendidas entre 0,15 mm y 0,0625 mm, arenas finas y muy finas, que son de mayor porcentaje que ingresan al desarenador. La porción de limo y arcilla es de mayor concentración, pero debemos de tener en cuenta que estos materiales no pueden ser decantados por ningún tipo de desarenador. Entonces decantar y evacuar las arenas finas y muy finas en el desarenador evitará el paso de altas concentraciones a las turbinas.

- Granulometría de los sólidos en suspensión evacuados por el sistema de purga del desarenador

La muestra analizada se obtuvo de los canales colectores de cada una de las naves, encontrado los siguientes materiales: arenas entre 0,3 mm y 0,0625 mm de diámetro en 46%, limo en 48% y arenas mayores de 0,2 mm en 7%.

Las arenas finas y muy finas representan el 41% del total, un 12% del material es eliminado por el desarenador, considerando que esta fracción de arena representa el 30% del material que ingresa al desarenador.

El material limoso es predominante en el sistema de purga, el desarenador elimina un 24% de este material, considerando que dicha porción representa el 49% del total de sólidos que ingresa al desarenador.

Granulometría de sólidos de suspensión en las turbinas

El diámetro efectivo está por debajo del límite inferior de la arena muy fina, prácticamente limo. El diámetro noventa está alrededor de la arena fina y el coeficiente de uniformidad es bajo de carácter homogéneo del material de 80% limo y 20% arena fina.

5.5.3. Análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión y por arrastre de fondo transportados por el río Santa

En Bocatoma

Los sólidos en suspensión están compuestos por: arenas que representan el 51,6%; el material limo – arcilla representan el 45,4%, en las arenas, predomina la arena fina con un 40,1%.

Entrada del desarenador

Los sólidos mayores de 0,25 mm representan apenas el 1,4%; la arena fina alcanza el 7%; la arena muy fina es el 15,2%; el limo grueso el 22% y las arcillas el 22,8%. El conjunto de arenas alcanza el 23%, de los cuales el 22,2% es menor de 0,25 mm; el material limoso es del 52,6%; las arcillas el 22,8%.

Salida del desarenador

Los sólidos comprendidos entre 0,25 mm y 0,0625 mm alcanzan el 32,5%; las arenas mayores de 0,25 mm representan el 6,6%; los limos alcanzan el 39,25%; las arcillas representan el 19,1%.

Material de suspensión que llega a los inyectores de las turbinas

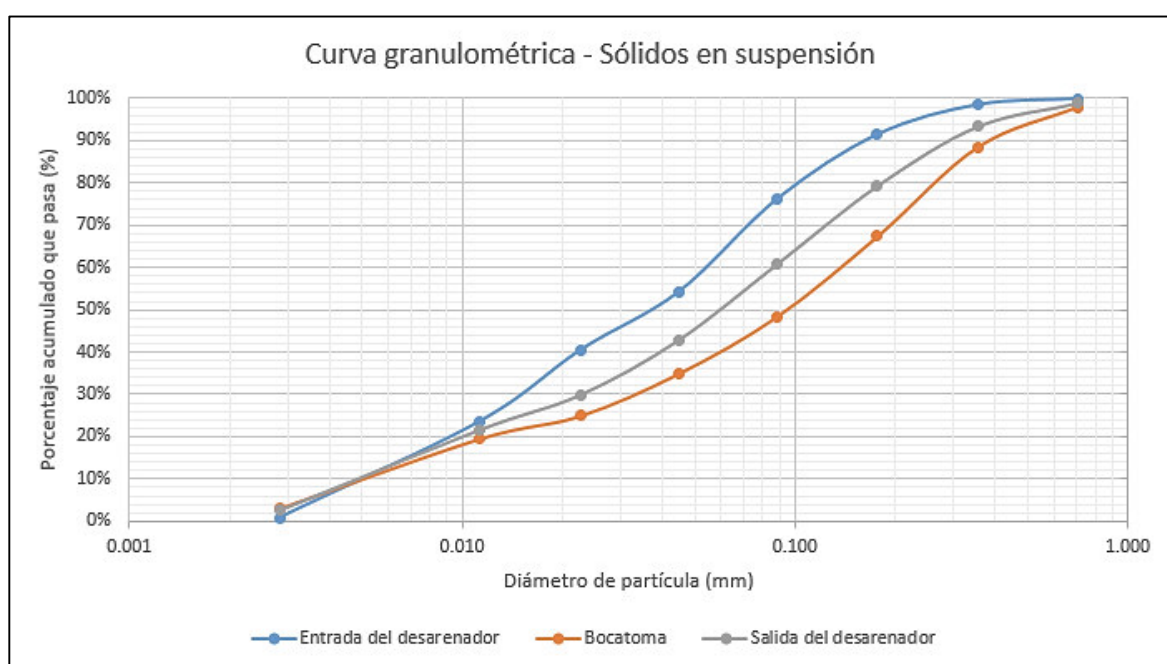
Es fundamentalmente limoso con un 64%, las arenas comprendidas entre 0,125 mm y 0,0625 mm representan el 10,5%; las arenas mayores de 0,125 mm son el 2,04%; las arcillas representan el 21,5%. Como se aprecia, siendo el limo el material con 2/3 del total que ingresa a los inyectores y ruedas de las turbinas.

A continuación, se detalla el análisis efectuado para el periodo de avenidas de 1985, expresado en la siguiente tabla y mediante la gráfica las curva granulométricas de los sólidos en suspensión de diferentes zonas de interés.

Tabla 5.7: Análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión y por arrastre de fondo transportados por el río Santa – Periodo: Avenida, 1985

Material	Tamaño (mm)		La Balsa (F) (%)	Bocatoma (S) (%)	Desarenador Entrada (S) (%)	Desarenador Salida (S) (%)	Desarenador Salida (D) (%)	inyector (S) (%)
Arena gruesa	1,0000	0,5000	13,60	2,00	0,10	1,10	0,13	0,50
Arena media	0,5000	0,2500	13,40	9,50	1,40	5,50	3,20	0,50
Arena fina	0,2500	0,1250	8,60	21,10	7,00	14,00	46,40	1,04
Arena muy fina	0,1250	0,0625	3,00	19,00	15,20	18,50	35,00	10,50
Limo grueso	0,0625	0,0320	1,30	13,50	22,00	18,00	11,00	23,50
Limo medio	0,0320	0,0160		10,00	13,80	13,00	1,10	24,00
Limo fino	0,0160	0,0080		5,40	16,80	8,25	0,70	16,50
Arcilla	0,0080	0,0010		16,50	22,80	19,10	0,52	21,50

Gráfica 5.1: Curva granulométrica de sólidos en suspensión en zonas de interés.



5.5.4. Velocidad de sedimentación y gravedad específica

El valor promedio de la velocidad de sedimentación para los sólidos en suspensión es 5,5 cm/s y para el material de fondo es 5 cm/s, para las arenas finas. Para el limo grueso la velocidad de caída esta entre 0,28 cm/s y 0,87 cm/s, el valor promedio para los sólidos en suspensión es 0,299 cm/s, el valor para el material de fondo es 0,3 cm/s.

La gravedad específica del material de fondo del río Santa en la estación La Balsa es 2,70. Para los sólidos en suspensión en el desarenador a la entrada es 2,84 y a la salida es 2,60, en los inyectores es 3,12, es el valor más elevado para las arenas finas. Para

el limo grueso, los valores son ligeramente menores que para las arenas finas, a la salida del desarenador es 2,56 y en los inyectores es 2,72.

5.5.5. Análisis mineralógico

Los estudios realizados por ELECTROPERU, concluyen que el cuarzo y la plagioclasa son los materiales predominantes en los sólidos en suspensión que ingresan al desarenador y llegan a las turbinas.

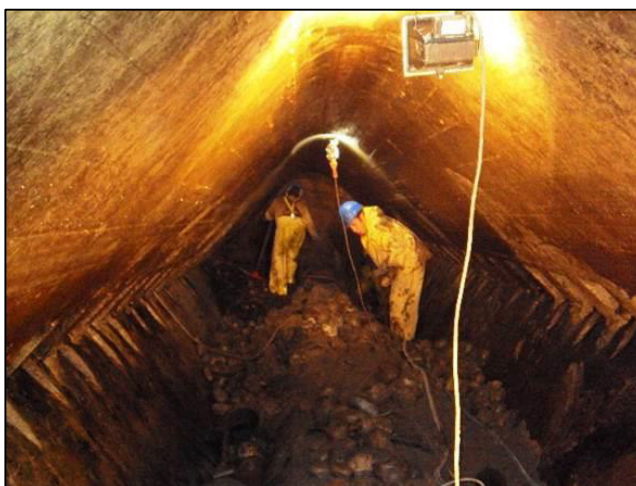
En el sistema Bocatoma – Desarenador – Turbina, los materiales con dureza mayor al acero representan entre 80% y 90% del total transportado. Además del cuarzo y la plagioclasa, existen la magnetita, ortosa y cuarzo ferruginoso.

En el mismo estudio, la forma de los minerales de alta dureza, 6 ó 7 escala de Mho, son los sub-angulares y angulosos. Esta forma de los minerales explica el alto poder abrasivo de los sólidos que colisionan con las piezas metálicas de acero de las turbinas que erosionan violenta y rápidamente en el periodo de avenidas.

El análisis se efectuó para la arena fina y el limo grueso, en ambos tipo de material el porcentaje de cuarzo y los otros minerales de similar dureza es casi exactamente lo mismo. El porcentaje de minerales de alta dureza en la entrada del desarenador es 55%, mientras que en la salida es 54% y en los inyectores es 58%.

El porcentaje de cuarzo que ingresa a los inyectores en la casa de máquinas es el 70%, mientras para el cuarzo ferruginoso es de 2%.

Fotografía 5.1: Sedimentos acumulados en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



6. METODOLOGIA

Para la simulación numérica hidrodinámica y de transporte de sedimentos se ha utilizado el software Ansys CFX, con la finalidad de obtener el patrón de flujo y las concentraciones en las secciones de interés. Debido a la problemática que presenta en la actualidad en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, por lo que se ha planteado trabajar la simulación numérica en dos partes.

La primera parte la simulación numérica comprende el flujo de agua limpia en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente y otra simulación sin la tabiquería. De estas simulaciones se ha obtenido la velocidad del flujo en las naves con diferentes caudales y la dirección de los vectores de velocidad. También se ha determinado zonas de vorticidad como distribución de los caudales en las diferentes naves.

La segunda parte la simulación numérica comprende el transporte de sedimentos en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería que existe actualmente con el fin de obtener las concentraciones en las secciones a lo largo de las naves. Esta simulación ha sido validada con los reporte de concentraciones que son emitidas en el sistema de captación y conducción de la central hidroeléctrica.

6.1. Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional o CFD, siglas en inglés, es una rama de la mecánica de fluidos que mediante del uso de computadoras, métodos numéricos y algoritmos, simula los flujos de fluidos y los fenómenos que se presentan en él. Para ello se basa en la resolución numérica de las ecuaciones generales de conservación de la masa (transporte), cantidad de movimiento y energía.

La metodología CFD se basa en diferentes ramas de la ciencia para lograr sus objetivos, estas son las matemáticas, la codificación, la física y la ingeniería. Todas estas ramas se consolidan e interrelacionan para poder desarrollar un código que pueda solucionar las ecuaciones gobernantes del flujo de una manera satisfactoria³².

³² (Fernández, 2012)

Estructura del código CFD³³

Proceso: es una interfaz de gran utilidad, permite ingresar los datos de entrada al sistema, además es un formato compatible para el solucionador. Comprende lo siguiente:

- Dominio del problema (geometría).
- Discretizar el problema, generación de mallado.
- Identificar de los fenómenos físicos a modelar.
- Establecer las propiedades de los fluidos.
- Determinar las condiciones de iniciales y de contorno del dominio.

Solver: es la parte más importante del programa de resolución, donde se lleva a cabo la resolución de forma iterativa de las ecuaciones que intervienen en el problema, que fueron escogidas previamente en el preproceso. Esta operación puede tardar desde minutos a semanas dependiendo de los modelos utilizados y del tamaño de la malla.

Postproceso: es una parte fundamental debido a que nos permite manejar los resultados obtenidos a partir de la codificación, esto se realiza mediante una interfaz gráfica y diferentes herramientas mostrar los resultados. Incluye:

- Mostrar el dominio del problema y la discretización.
- Vista de contornos de las variables y líneas de trayectorias de partículas o fluidos.
- Gráficas, distribuciones, animaciones y exportaciones de resultados a otros formatos.

Tipos de mallados computacionales³⁴

Mallado estructural: realiza la discretización del dominio del problema de forma uniforme, buscando la ortogonalidad, conformada por un patrón de bloques repetitivos, donde se puede realizar un arreglo coordinado. En dos dimensiones las

³³ (Fernández, 2012)

³⁴ (Luzuriaga y Amaya, 2014)

mallas contienen elementos cuadriláteros, mientras que en tres dimensiones la componen hexaedros.

Mallado no estructurado: este tipo de discretización es arbitraria para cubrir todo el dominio del problema, debido a que no tienen un patrón repetitivo de ordenamiento de elementos. En dos dimensiones las mallas están compuestas por triángulos, mientras que en tres dimensiones por tetraedros. La ventaja de generar este tipo de malla es que su uso es versátil, requiere pocos datos para su generación y se adapta a cualquier geometría, mientras que uno de sus problemas es generar arreglos en zonas de interés.

Mallado híbrido: esta discretización es una mezcla de las dos tipos de mallas mencionadas anteriormente, utilizada en dominios de problema o representación de un fenómeno donde existe una parte específica y de mayor análisis donde se utiliza una malla no estructurada, mientras que el dominio restante se puede generar una malla estructurada para evitar el costo computacional.

Conceptos de validez de una ecuación numérica³⁵

- Precisión: relaciona la solución numérica con la solución real o exacta.
- Consistencia: cuando el error de truncamiento tiende a cero (discretización cada vez más fina).
- Estabilidad: cuando el proceso iterativo converge e inestable cuando este diverge.
- Convergencia: cuando el proceso iterativo se ha realizado satisfactoriamente o cuando la convergencia es independiente a la discretización del dominio.

6.2. Modelo numérico

6.2.1. Generalidades

El software ANSYS CFX es un programa de dinámica de fluidos de alto rendimiento y de uso general que los ingenieros han implicado para resolver problemas de flujo de fluidos de gran alcance durante más de 20 años. El corazón de CFX es una tecnología de resolución avanzada, la clave para lograr soluciones confiables y

³⁵ (Fernández, 2012)

precisas de manera rápida y sólida. El solucionador moderno y altamente paralelizado es la base de una abundante selección de modelos físicos que capturan prácticamente cualquier tipo de fenómenos relacionados con el flujo de fluidos. El solucionador y los modelos están envueltos en un entorno intuitivo y flexible, con amplias capacidades de personalización y automatización mediante el uso de un potente lenguaje de expresiones.

6.2.2. Ecuaciones gobernantes³⁶

Para poder simular correctamente un tipo de flujo, la transferencia de calor o los fenómenos físicos relacionados, es necesario describir en términos matemáticos los fenómenos físicos involucrados.

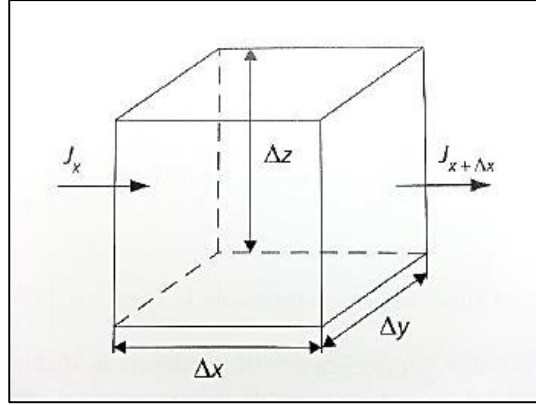
Los principios de conservación se encuentran prácticamente en los fenómenos físicos de interés de la Mecánica de Fluidos, las cuales se encuentran expresadas en forma de ecuaciones en derivadas parciales. De esta forma, la ecuación de continuidad expresa la conservación de masa; la ecuación de momento expresa la conservación del momento lineal; y la ecuación de energía expresa la conservación de la energía total del flujo.

A continuación, se va explicar en la figura, como una variable ϕ mediante una variación temporal en un volumen de control (VC) de dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, se cumple el principio de conservación.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Incremento de } \phi \\ \text{en el VC respecto} \\ \text{del tiempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Flujo neto de } \phi \text{ que} \\ \text{entra en el VC por} \\ \text{las superficies} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Generación neta de } \phi \\ \text{en el interior del VC} \\ \text{respecto del tiempo} \end{array} \right] \quad (6.1)$$

³⁶ (Fernández, 2012)

Figura 6.1: Volumen de control.



La ecuación que se va a presentar a continuación es la ecuación general de conservación (o transporte) y es el punto de partida que emplea el método de volúmenes finitos.

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot (\rho \bar{v} \phi) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_V S_\phi dV \quad (6.2)$$

Donde ϕ es una variable genérica que, según el valor que adopte genera las ecuaciones que se desarrollan a continuación; ρ es la densidad del fluido; S_ϕ presenta el término fuente y \bar{v} es vector de velocidad de flujo de forma general como $\bar{v} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}$.

Esta misma ecuación se puede expresar de forma vectorial como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S \quad (6.3)$$

Temporal + Convectivo = Difusivo + Fuente

Podemos observar que la ecuación general presenta cuatro términos, estos son:

Término temporal: variación local en el tiempo dentro del volumen de control (disminución o acumulación de ϕ).

Término convectivo: transporte debido a la velocidad de flujo de una variable de un punto a otro dentro del dominio.

Término difusivo: fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular.

- Ley de Fourier para difusión de calor.
- Ley de Fick para la difusión de masa.
- Ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.

Término fuente: para las fuentes de destrucción o generación de la variable transportada.

Mediante el teorema de Gauss las integrales de volumen se transforman en integrales de superficie sobre los contornos del volumen de control para los términos convectivos y difusivos. Entonces:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \int_S (\rho \bar{v} \phi) \cdot d\bar{A} = \int_S (\Gamma \nabla \phi) \cdot d\bar{A} + \int_S S_\phi dV \quad (6.4)$$

Ecuación de conservación de masa

También conocida como ecuación de continuidad, establece el aumento de la masa en un elemento fluido debido al flujo neto de la masa que ingresa al elemento. La exposición no estacionaria, tridimensional, en un punto para un fluido en general es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) \quad (6.5)$$

Para obtener esta ecuación, se parte de la ecuación general con la densidad como variable intensiva, es decir, $\phi = 1$, donde los términos no difusivo y fuente se anulan: $\Gamma = S = 0$.

Ecuación de conservación de momento

Para un fluido newtoniano e incompresible se expresa de forma general como:

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = \nabla(\mu \nabla \bar{v}) - \nabla p + \rho \bar{g} \quad (6.6)$$

Se obtiene una ecuación vectorial, debido a que se ha fijado como variable intensiva a la velocidad en la ecuación general, es decir, $\phi = \bar{v} = (u, v, w)$, el coeficiente de difusión sea la viscosidad, $\Gamma = \mu$, y donde el término fuente incorpore el gradiente de presiones y el campo gravitatorio.

Ecuación de conservación de la energía

La expresión es muy laboriosa, por eso se va a expresar en términos conservativos. Por lo que se considera un flujo a baja velocidad, incompresible y se desprecia la disipación viscosa.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla h \right) + S_h \quad (6.7)$$

La ecuación de la energía también se puede obtener de la ecuación general de conservación si se fija $\phi = h$, $\Gamma = k/C_p$ y $S = S_h$, donde k representa conductividad térmica del fluido, C_p término convectivo y h la entalpía.

6.2.3. Modelo de turbulencia³⁷

La turbulencia es un fenómeno físico caótico y complejo, y mediante la estadística se puede analizar su comportamiento, en donde se presentan vórtices turbulentos que se crean y se destruyen. Este fenómeno es una característica del flujo de fluidos.

Las propiedades de los movimientos turbulentos son:

- Aleatoriedad: es una de las características más importantes, debido a que las variables fluidodinámicas; como la velocidad, presión, temperatura y concentración, fluctúan.
- Vorticidad: es indispensable para la existencia de la turbulencia, además todo flujo turbulento es rotacional ($\nabla \times \bar{v} \neq 0$).

³⁷ (Fernández, 2012)

- Difusividad: debido a los fenómenos turbulentos en las fluctuaciones de sus escalas provocan la intensificación del transporte de masa, momento y energía.

Existen otras particularidades para el flujo turbulento como:

- Tridimensionalidad.
- Disipación.
- Altos números de Reynolds.

El problema de cierre turbulento ocurre cuando no se tiene el sistema de ecuaciones cerrado debido a las incógnitas que generan las ecuaciones gobernantes en la solución del problema, para ellos se utilizan variables estadísticas mediante las ecuaciones de Navier – Stokes..

Aproximaciones numéricas para el tratamiento de la turbulencia

Se realiza mediante aproximaciones en la simulación en función de números de escalas de turbulencia.

- **Simulación Numérica Directa (DNS)**

Resuelve todas las escalas de turbulencia debido a la utilización de un mallado fino, en donde la distancia entre nodos no puede ser mayor a la escala más pequeña de la turbulencia por lo que origina un mayor costo computacional.

- **Large Eddy Simulations (LES)**

Simulan vórtices más grandes por lo que originan mallados menos densos que resuelven los torbellinos más grandes (50 a 80% de toda la energía turbulenta).

Son técnicas intermedias entre DNS y RANS, para escalas grandes se resuelven mediante el sistema de ecuaciones, mientras que los efectos de las escalas pequeñas sobre la turbulencia se modelizan. Esta técnica se parece a la DNS porque necesita un mallado muy fino, pero no tanto como las DNS.

Los torbellinos son difíciles de modelizar por eso se resuelven mediante ecuaciones, en cambio, las escalas pequeñas exigen discretización extremadamente fina por eso se modelizan.

- **Reynolds – Averaged Navier – Stokes (RANS)**

Las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds en donde todas las escalas de turbulencia se resuelven por modelos de turbulentos. Este método es uno de los más utilizados.

Utiliza la idea de promediado (promediado temporal) sobre las ecuaciones de transporte. Además, el efecto de las fluctuaciones turbulentas, denominados tensiones de Reynolds, deben ser modelados para cerrar el sistema de ecuaciones.

Modelos de viscosidad artificial (Eddy Viscosity Model, EVM)

Modelo Spalart – Allmaras: resuelve una única ecuación de transporte para una turbulencia viscosa modificada $\bar{\nu}$ que relaciona con μ_t según la función:

$$\mu_t = f(\bar{\nu}) \quad (6.8)$$

Modelo $k - \varepsilon$: el modelo $k - \epsilon$ es un método simple más completo. Resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación viscosa ε que se relacionan con μ_t , según la función:

$$\mu_t = f\left(\frac{\rho k^2}{\varepsilon}\right) \quad (6.9)$$

La ecuación de transporte de k se obtiene sumando las ecuaciones de Navier – Stokes, mientras que ε se deduce de razonamientos físicos y analogías diversas de k .

Modelo $k - \omega$: el modelo $k - \omega$ agrega pequeñas modificaciones a los modelos $k - \epsilon$ para hacerlos más apropiados a flujos turbulentos a bajos números de Reynolds.

Resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa específica de disipación viscosa $\omega = \varepsilon/k$ que relacionan con μ_t según la función:

$$\mu_t = f\left(\frac{\rho k}{\omega}\right) \quad (6.10)$$

Responde muy bien a los flujos de transición, incluso a gradientes de presión muy importantes.

Existe un modelo complementario denominado SST $k - \omega$ para la formulación más robusta en la zona de interés, como en el desarrollo de la capa límite.

6.2.4. Modelos multifásicos

Macroscópicamente los fluidos de la naturaleza y de la industria presentan mezclas de fases complejas. Se denomina fase al estado particular de la materia (sólido, líquido, gaseoso).

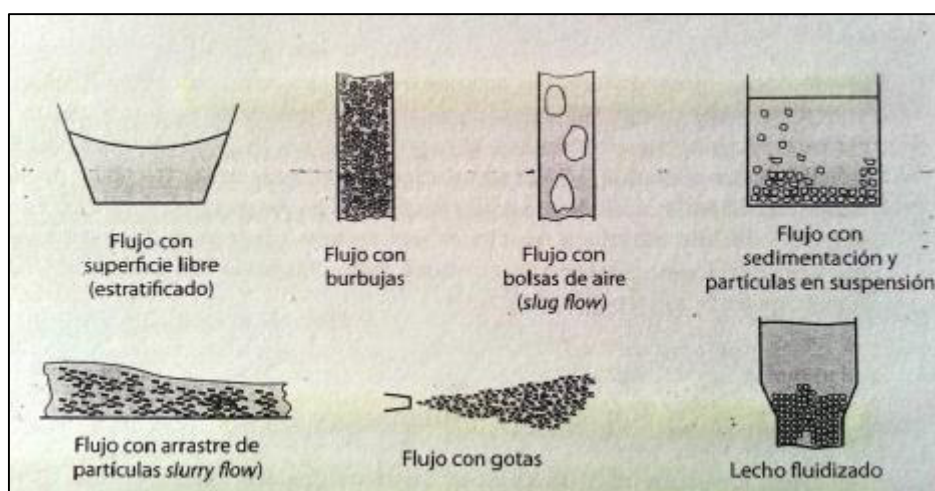
En los flujos multifásicos, las fases se definen, como un material identificable, con fronteras bien definidas (macroscópicamente) y que presentan interacción con el flujo en el que está confinado.

Existen materiales que estando en un mismo estado presentan diferentes propiedades fisicoquímicas en donde se puede identificar la interfaz, como en la mezcla de agua y aire.

En los flujos multifásicos, la fase primaria y principal es continua (fluido), mientras que el resto de fase deben estar dispersas, interpenetradas en el flujo principal o de forma continua, generando una interfaz bien definida (fases secundarias)³⁸.

³⁸ (Fernández, 2012)

Figura 6.2: Flujos multifásicos.



El software Ansys CFX establece dos tipos de modelos multifásicos para simular los diferentes flujos que se muestran en la figura 6.2: el modelo Euleriano multifásico y para el transporte de partículas mediante la función multifásica de Lagrange. El modelo Euleriano multifásico presenta dos submodelos: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia en la interfase, donde la solución se da por fases³⁹.

En este trabajo vamos a simular escenarios que presentan superficie libre, donde la tasa de transferencia en la interfaz es grande, originando que los fluidos compartan un campo de flujo común que es válido en los flujos de gravedad. A continuación, explicaremos el modelo homogéneo.

Modelo homogéneo⁴⁰

En el flujo homogéneo multifásico, un campo de flujo común es compartido por todos los fluidos, así como para los campos de temperatura y turbulencia.

Las cantidades transportadas en el modelo homogéneo son lo mismo para todas las fases, excepto en la fracción volumen, es decir:

$$\varphi_{\alpha} = \varphi \quad (6.11)$$

$$1 \leq \alpha \leq Np \quad (6.12)$$

³⁹ (Carrillo y Castillo, 2013)

⁴⁰ (ANSYS, 2013)

Debido a ese proceso que se desarrolla en el flujo homogéneo multifásico, ya no es necesario resolver las ecuaciones de transporte fásico de forma individual.

Las ecuaciones de transporte masivo se obtienen sumando las ecuaciones de transporte fásico individuales sobre las fases para obtener una ecuación de transporte única para φ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla \cdot (\rho U\varphi - \Gamma \nabla \varphi) = S \quad (6.13)$$

Donde:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} \rho_{\alpha} \quad (6.14)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} \rho_{\alpha} U_{\alpha} \quad (6.15)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} \Gamma_{\alpha} \quad (6.16)$$

Ecuaciones hidrodinámicas homogéneas

- **Ecuación de momento**

El modelo homogéneo para el transporte del momento supone:

$$U_{\alpha} = U \quad (6.17)$$

$$1 \leq \alpha \leq Np \quad (6.18)$$

Y viene dado por la Ecuación de Continuidad para flujo multifásico inhomogéneo

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (r_{\alpha} \rho_{\alpha} U_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{Np} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (6.19)$$

Donde $S_{MS\alpha}$ describe las fuentes de masa específicas por el usuario, y $\Gamma_{\alpha\beta}$ es el caudal másico por unidad de volumen de la fase β para la fase α . Este término sólo ocurre si la interfase se produce la transferencia de masa.

Y la ecuación de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot [\rho U \times U - \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)] = S_M - \nabla p \quad (6.20)$$

Donde:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} \rho_{\alpha} \quad (6.21)$$

$$\mu = \sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} \mu_{\alpha} \quad (6.22)$$

Hay que señalar que los términos de transferencia de interfase han sido cancelados y además es una ecuación de transporte monofásico, con viscosidad y densidad variable.

- **Ecuación de continuidad**

La ecuación de continuidad homogénea es la misma que para la multifásica completa, ecuación 6.19, excepto U no es específico de la fase.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (r_{\alpha} \rho_{\alpha} U) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{Np} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (6.23)$$

- **Ecuación de conservación de volumen**

La ecuación homogénea de conservación del volumen es la misma que para la multifásica completa, excepto U no es específico de la fase.

$$\sum_{\alpha=1}^{Np} r_{\alpha} = 1 \quad (6.24)$$

- **Restricción de presión**

La restricción de presión para el flujo multifásico completo también se usa para fases homogéneas multifásicas.

$$p_{\alpha} = p \quad (6.25)$$

Para todo $\alpha = 1, \dots, Np$

Flujo de superficie libre⁴¹

La implementación del flujo de superficie libre en el software Ansys CFX es esencialmente la misma para el modelo homogéneo e inhomogéneo, junto con algunas opciones especiales de discretización para mantener la interfaz nítida, estas incluyen:

Un esquema de diferencia compresiva para la derivación para la advección de fracciones de volumen en las ecuaciones de la fracción volumétrica.

Un esquema transitorio de compresión para las ecuaciones de la fracción de volumen (si el problema es transitorio).

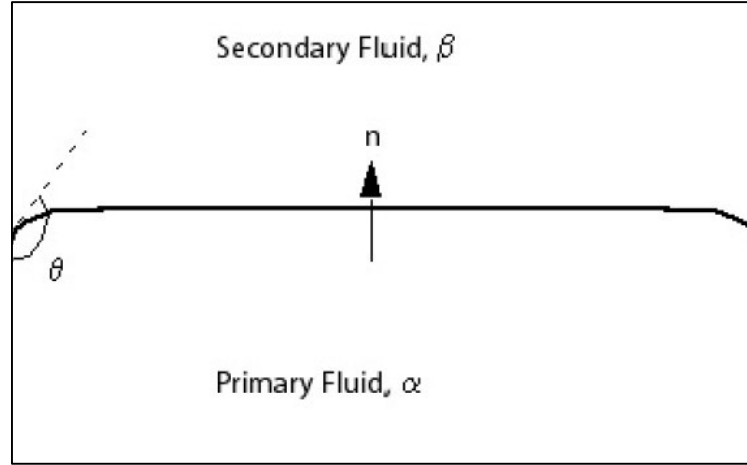
Tratamiento especial del gradiente de presión y de los términos de la gravedad para que el flujo permanezca bien comportado con la interfaz.

Tensión superficial

El modelo que utiliza en el software Ansys CFX se basa en el modelo de Fuerza Superficial de Brackill. Esto modela la fuerza de tensión superficial como una fuerza de volumen concentrada en la interfaz, mas que una fuerza superficial. En la siguiente imagen se muestra la interfaz de superficie libre:

⁴¹ (ANSYS, 2013)

Figura 6.3: Interfase de superficie libre.



Donde podemos definir un fluido primario α (fase líquida) y un fluido secundario β (fase gaseosa). La fuerza de tensión superficial dado por el modelo de Fuerza Continua de Superficie es:

$$F_{\alpha\beta} = f_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (6.26)$$

Donde:

$$f_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} k_{\alpha\beta} n_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (6.27)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha\beta}| \quad (6.28)$$

Donde σ es el coeficiente de tensión superficial, $n_{\alpha\beta}$ es el vector normal de la interfaz que apunta desde el fluido primario al fluido secundario, $\nabla_s \sigma$ es el operador de gradiente en la interfaz y k es la curvatura superficial definida por:

$$k_{\alpha\beta} = \nabla \cdot n_{\alpha\beta} \quad (6.29)$$

Los términos sumados de la ecuación 6.27 reflejan los valores de las componentes normales y tangenciales de la fuerza de tensión superficial respectivamente. A partir de la interfaz curvatura surge la componente normal y el componente tangencial a partir de las variaciones en el coeficiente de tensión superficial.

El término $\delta_{\alpha\beta}$ es la función delta de la interfaz, es cero lejos de la interfaz; por lo tanto, asegurando que la fuerza de tensión superficial está activa cerca de la interfaz.

El vector normal de interfaz usado para los cálculos tanto de la curvatura como de la fuerza de tensión superficial debe satisfacer el ángulo de contacto θ que la interfaz hace con la pared a través del fluido primario.

6.2.5. Modelo de transporte de sedimentos⁴²

En el software Ansys CFX, el modelado de transporte de partículas es un tipo de modelo multifásico, donde las partículas se rastrea a través del flujo de una manera lagrangiana, en lugar de modelarse como una fase euleriana extra. La fase de partículas completa se modela con una sola muestra de partículas individuales. El seguimiento se lleva a cabo, formando un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo para cada partícula, que consiste en ecuaciones de posición, velocidad, temperatura y masa. Estas ecuaciones se integran utilizando un método de integración simple para calcular el comportamiento de las partículas a medida que atraviesan el dominio del flujo.

La implementación de Ansys CFX dentro del modelo de transporte de partículas, es que el flujo total de la fase de partículas se modela mediante el seguimiento de un pequeño número de partículas a través del fluido continuo. Las partículas podrían ser partículas sólidas, gotas o burbujas.

La aplicación del seguimiento de Lagrange en CFX implica la integración de rutas de partículas a través del dominio discretizado. Las partículas individuales se rastrea desde un punto de inyección hasta que escapan del dominio, o se cumpla algún criterio de límite de integración. Cada partícula se inyecta, a su vez, para proteger un promedio de todas las pistas de partículas y para generar términos de origen para las ecuaciones de masa de fluido, momento y energía. Debido a que cada partícula se rastrea desde un punto de inyección hasta su destino final, el procedimiento de seguimiento es aplicable al análisis de flujo estacionario.

Ansys CFX presenta opciones de acoplamiento de pares de fluidos de partículas, donde las partículas pueden estar totalmente acopladas al fluido continuo o pueden estar acopladas en una sola dirección. Las partículas totalmente acopladas intercambian impulso con la fase continua, afectando las partículas por el medio

⁴² (Ansys, 2013)

continuo y viceversa, mientras que el acoplamiento unidireccional simplemente predice las trayectorias de las partículas como un proceso posterior basado en el campo de flujo y, por lo tanto, no influye en el campo de flujo de la fase continua.

Modelos de erosión

Ansys CFX establece dos modelos para el estudio de erosión, el modelo de Finnie y el modelo de Tabakoff y Grant. El primero de ellos es un modelo más sencillo y el más utilizado para el estudio de erosión, mientras que el otro modelo es más complejo porque requiere definir una mayor cantidad de parámetros que provienen de data experimental. En este trabajo se utilizará el modelo Finnie que será descrito a continuación.

○ Modelo de Finnie

El desgaste de una pared debido al efecto erosivo de los impactos de partículas es una función compleja del impacto de partículas, partículas y propiedades de la pared. Para casi todos los metales, se encuentra que la erosión varía con el ángulo de impacto y la velocidad de acuerdo con la relación.

$$E = k \cdot V_p^n \cdot f(\gamma) \quad (6.30)$$

Donde E es una masa sin dimensión, V_p es la velocidad de impacto de la partícula y $f(\gamma)$ es una función adimensional del ángulo de impacto. El ángulo de impacto es el ángulo en radianes entre la trayectoria de la partícula que se aproxima y la pared. El valor del exponente n generalmente está en el rango de 2,3 a 2,5 para metales.

La función adimensional del ángulo de impacto está dado por:

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^n \gamma \quad \text{si } \tan \gamma > \frac{1}{3} \quad (6.31)$$

$$f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3 \sin^2 \gamma \quad \text{si } \tan \gamma \leq \frac{1}{3} \quad (6.32)$$

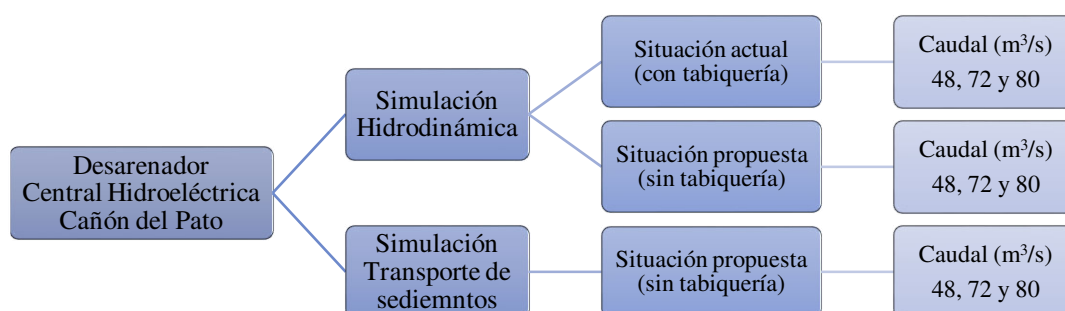
6.3. Escenarios a simular

Según la finalidad del presente estudio se va a realizar la simulación hidrodinámica y de transporte de sedimentos del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del

Pato, las cuales comprenden las estructuras del canal de acceso, transición y las naves del desarenador.

Cabe recalcar que por motivos de costo computacional e información para constatar los resultados de las simulaciones, se ha determinado los siguientes escenarios que cumplen con los objetivos del trabajo a presentar.

Figura 6.4: Diseño del proceso de simulación.



La primera parte comprende la Simulación Hidrodinámica para dos escenarios diferentes:

Escenario 1: Situación actual del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que se presenta en las naves centrales y laterales en toda su longitud.

Escenario 2: Situación propuesta para la mejora del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería que se presenta actualmente.

De la simulación hidrodinámica se han determinado los vectores de velocidad de flujo en secciones transversales y longitudinales, velocidades horizontales, niveles de superficie libre y flujos turbulentos.

La segunda parte, es la simulación de transporte de sedimentos de la situación propuesta para la mejora, eso quiere decir sin la tabiquería que se presenta actualmente. En donde se considera los niveles de agua en la estructura del desarenador, determinada en la simulación hidrodinámica. Además, se considera el

análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión en la estructura del desarenador que fueron medidos in situ en estudios anteriores.

Los resultados de esta parte de la simulación, muestran valores de concentración en diferentes zonas, trayectoria de partículas en las naves centrales y laterales, y aspecto de eficiencia del desarenador.

Caudales a simular

- Caudal de 48 m³/s: es el caudal de diseño del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato de concepción francesa⁴³.
- Caudal de 72 m³/s: es el caudal que se necesita para una generación de 240 MW debido a la repotenciación de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato⁴⁴.
- Caudal de 80 m³/s: es el caudal que se necesita para generar 265.565 MW debido a la prueba de potencia realizada en febrero del 2016, adquiriendo la nueva potencia instalada para la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

6.4. Simulación hidrodinámica

6.4.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente

Dominio del problema

Para el estudio del patrón de flujo de agua y de transporte de sedimentos, no se consideró toda la geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, solo se utilizó la mitad de ella, debido a que presenta simetría y es posible simular solo una parte de ella y así el costo computacional se minimiza.

La geometría a simular inicia con el canal de acceso al desarenador, que presenta una longitud de 45 m, necesaria para que el flujo de agua se desarrolle uniformemente, luego se presenta la transición curva que une el canal de acceso con las naves del desarenador, la geometría del desarenador está conformada por las naves centrales y

⁴³ (Valdivia, 1996)

⁴⁴ (Castro I. y Velásquez T., 2007)

laterales, y la parte final de la geometría está compuesta por el vertedero seguida de la tubería de presión vertical denominada “pique”.

Las dimensiones de las estructuras a simular se encuentran descritas en el Capítulo 4, en el subcapítulo “El desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato”, además se adjuntan en el anexo de este trabajo los planos a detalle con vista en planta y cortes transversales y longitudinales del desarenador.

El software Ansys mediante el módulo *DesignModeler*, permite insertar a la interfaz del software la geometría del dominio a simular, para ello se debe importar dicha geometría con una extensión x_b, por lo cual se tuvo que construir la geometría en la plataforma 3D Modeling del software AutoCAD a partir de los planos detallados del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

Para la simulación hidrodinámica de la situación actual del desarenador, con presencia de tabiquería en la longitud de las naves, se realizaron dos geometrías. La primera geometría contiene la tabiquería solo en la nave central, mientras que la segunda contiene solo en el largo de la nave lateral.

Figura 6.5: Vista isométrica de la geometría del desarenador – Nave central tabicada

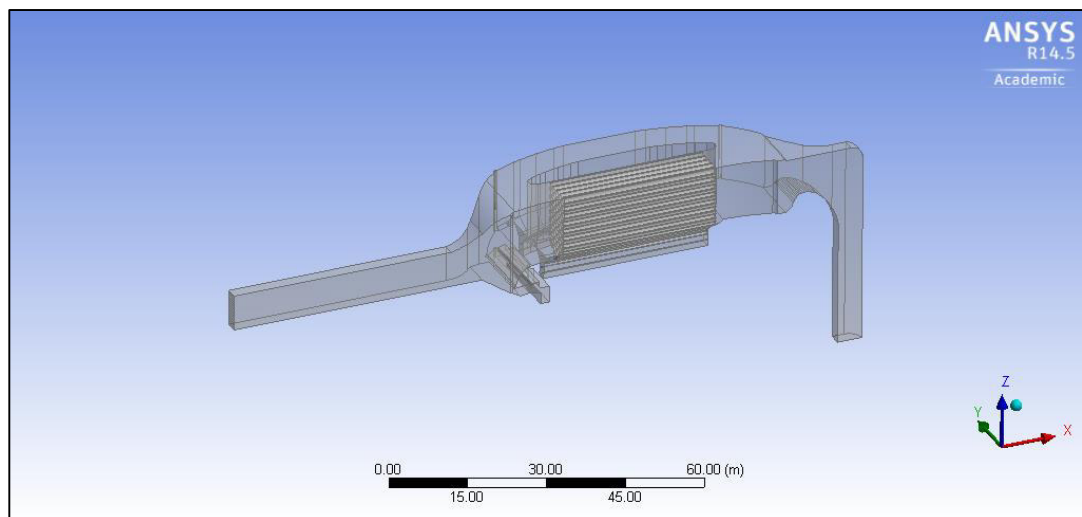
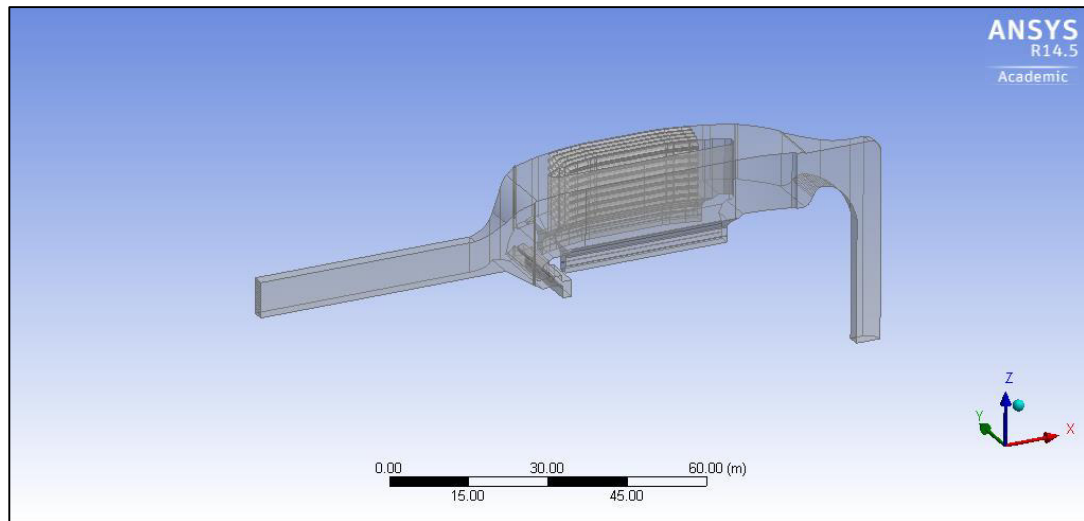


Figura 6.6: Vista isométrica de la geometría del desarenador – Nave lateral tabicada



Discretización del dominio

Es una de la etapas de la simulación más importante para obtener buenos resultados, por lo cual se realiza simulaciones previas con diferentes tipos de mallados hasta encontrar el más óptimo. Mientras, el mallado de la geometría se va haciendo cada vez más fino, este se aproxima más al continuo, otorgando resultados próximos a la realidad pero efectuando un mayor costo computacional.

Para este proceso se debe tener en cuenta el dominio del problema, en donde se identifica que tipo de mallado se va a utilizar, en este trabajo se va a realizar un mallado no estructurado debido a que la geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato presenta complejidades en sus estructuras.

El software Ansys ofrece el módulo *Meshing* en donde se puede importar la geometría, y con los diferentes comandos se puede generar el mallado más conveniente para la simulación a realizar. Para la simulación del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato se utilizó la herramienta *Body Sizing* en donde divide el volumen de la geometría del desarenador en pequeños elementos tetraédricos que se adaptan a la complejidad de la geometría generando un mallado no estructurado.

Para el análisis de discretización del dominio del desarenador se realizó la validación de los diferentes mallados no estructurados en función del tamaño de los elementos tetraédricos. Este análisis se explicará más adelante en la validación de los resultados

de la simulación con información recopilada in situ de los estudios anteriores de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

A continuación, se muestra el número de nodos y elementos tetraédricos en función del tamaño de los elementos designado en cada uno de los mallados de las geometrías a simular.

Cuadro 6.1: Discretización en función del tamaño del elemento – Nave Central

Mallado - Nave Central		
Tamaño (m)	Cantidad	
	Elementos	Nodos
0,400	2 152 979	426 153
0,350	3 097 625	608 297
0,300	4 719 939	902 782
0,275	6 099 444	1 157 019
0,250	7 949 946	1 484 955

Cuadro 6.2: Discretización en función del tamaño del elemento – Nave Lateral

Mallado - Nave Lateral		
Tamaño (m)	Cantidad	
	Elementos	Nodos
0,300	4 731 496	893 689
0,275	6 196 411	1 176 617
0,250	8 001 538	1 484 346

Figura 6.7: Discretización del desarenador con la tabiquería en la nave central de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

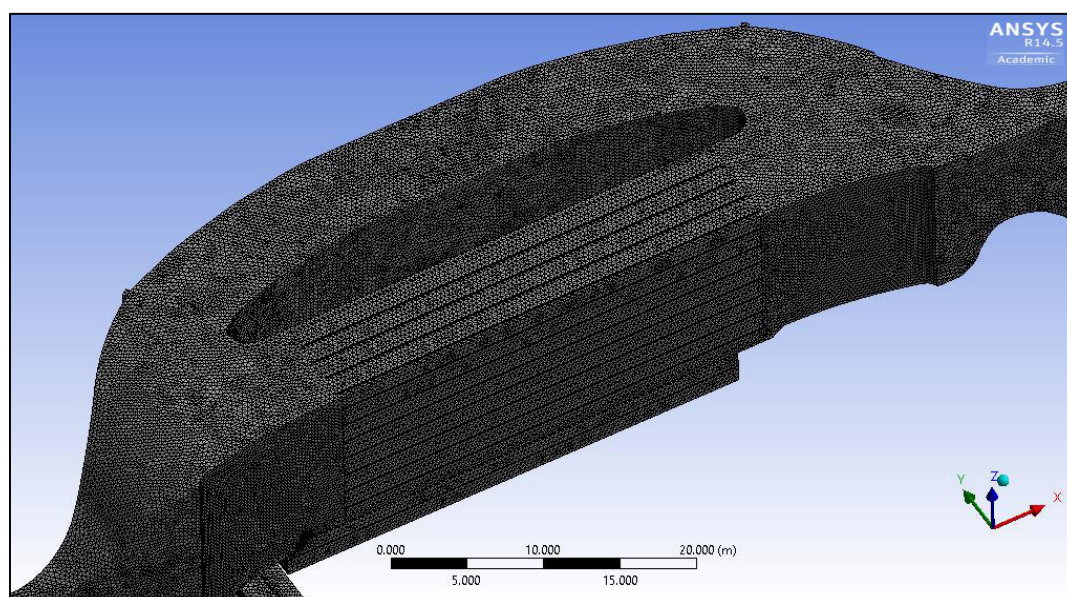
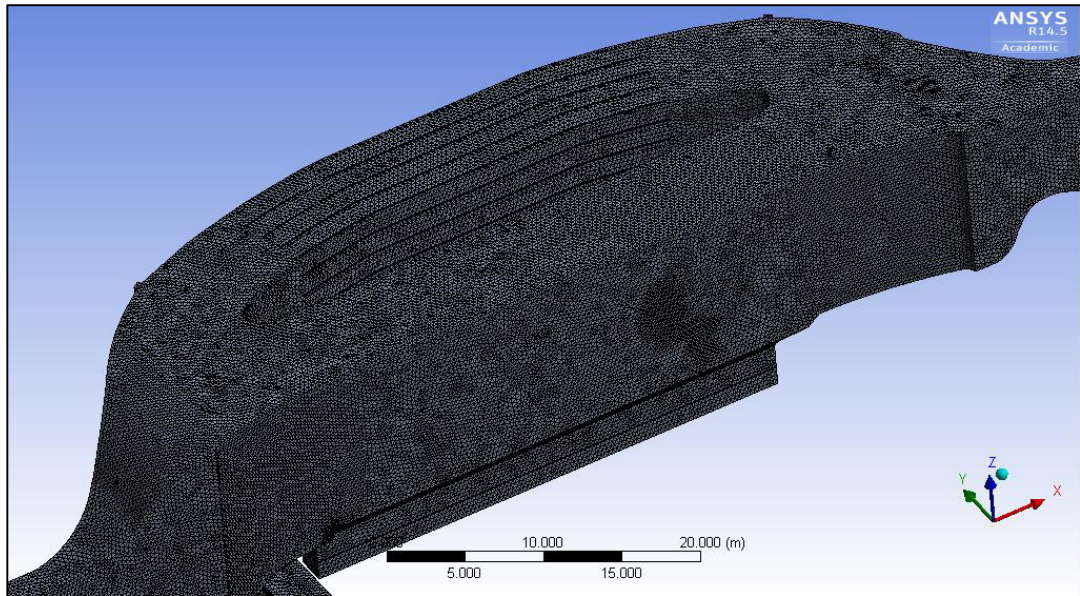


Figura 6.8: Discretización del desarenador con la tabiquería en la nave lateral de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



Condiciones de contorno

1. Detalles del dominio

La siguiente tabla muestra los detalles del dominio del modelamiento de fluidos para los diferentes escenarios a simular.

Cuadro 6.3: Valores y parámetros del dominio

Características generales	
Condiciones básicas	
Tipo de dominio	Dominio fluido
Lista de fluidos	Aire a 25°C, Agua
Modelos del dominio	
Presión	
Presión de Referencia	1 atm
Flotabilidad	
Opción	Boyante
Gravedad en x	0
Gravedad en y	0
Gravedad en z	- g
Densidad boyante de referencia	1,185 Kg/m ³
Modelos de los fluidos	
Opciones de multifase	Modelo homogéneo
Modelo de superficie libre	Standard
Modelo de turbulencias	k-epsilon
Detalles de los fluidos	
Aire a 25°C	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Agua	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Pares de fluidos	
Aire a 25°C - Agua	
Transferencia Interfacial	Superficie Libre
Fluido primario	Agua
Coefficiente de tensión superficial	0,072 N/m

2. Entrada de agua

Para determinar el tirante en el canal de acceso del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato de los diferentes escenarios a simular se utilizó la ecuación de Manning⁴⁵ en el sistema métrico decimal:

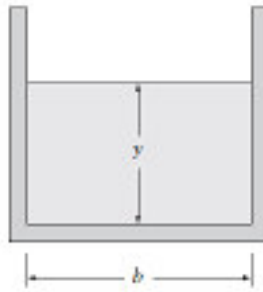
$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n} \quad (6.33)$$

⁴⁵ (Ven to Chow, 1994)

Donde Q es el caudal en m^3/s , A es la sección de entrada de flujo en m^2 , n es el coeficiente de rugosidad de Manning en $\text{s}/\text{m}^{1/3}$, S es la pendiente del canal (adimensional), R es el radio hidráulico en m .

En la siguiente figura se representa las dimensiones a considerar en el canal de acceso, donde b es el ancho del canal e y es el tirante de agua en la sección del canal, de las cuales van a ser reemplazadas en la Ecuación 6.33 para determinar los tirantes de los diferentes escenarios a simular.

Figura 6.9: Dimensiones del canal de acceso al desarenador



Luego, la ecuación 6.33, se tiene:

$$Q = \frac{(b \cdot y) \left(\frac{b \cdot y}{b + 2y} \right)^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (6.34)$$

Ahora despejando y , para determinar el tirante de agua:

$$y = \frac{Q \cdot n}{b \cdot S^{1/2}} \left(\frac{b + 2y}{b \cdot y} \right)^{2/3} \quad (6.35)$$

Con esta ecuación, se itera el valor y . Para ello se ingresa un valor y_1 en la ecuación obteniendo un valor y_2 . Luego se ingresa el valor y_2 a la ecuación para obtener y_3 . Esta operación se realiza hasta que el valor ingresado sea muy parecido al valor obtenido.

Los valores para determinar el tirante de cada uno de los escenarios se presentan en los siguientes cuadros⁴⁶.

Cuadro 6.4: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$

Parámetro	Valor	Unidad
Q	48,00	m^3/s
b	5,00	m
S	0,0015	-
n	0,33	-
y	5,6659	m

Cuadro 6.5: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$

Parámetro	Valor	Unidad
Q	72,00	m^3/s
b	5,00	m
S	0,0015	-
n	0,33	-
y	7,9870	m

Cuadro 6.6: Tirante de agua en el canal de acceso del desarenador para un $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$

Parámetro	Valor	Unidad
Q	80,00	m^3/s
b	5,00	m
S	0,0015	-
n	0,33	-
y	8,7509	m

Con el resultado de los tirantes para los diferentes escenarios a simular, se delimita el área por donde ingresará el fluido, en este caso agua, por el canal de acceso al desarenador.

Además, el software nos permite ingresar valores de caudales, pero estos deben ser ingresados en valores de flujo másico, para ello se detalla la siguiente ecuación.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (6.36)$$

⁴⁶ (Electroperu S.A., 1985)

Donde \dot{m} es el flujo másico en Kg/s, ρ es la densidad del fluido en Kg/m³, V es la velocidad del fluido en m/s y A es el área por donde ingresa el fluido.

También se puede expresar en función del caudal.

$$\dot{m} = \rho Q \quad (6.37)$$

Reemplazamos los parámetros para obtener el flujo másico del caudal que va ingresar al canal de acceso del desarenador, para ello consideramos la densidad del agua ($\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$), y trabajaremos con el primer caudal a simular, en este caso es 48 m³/s. Cabe recalcar que trabajaremos de la misma manera para los otros caudales a simular.

$$\dot{m} = 1\,000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 48 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 48\,000 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \quad (6.38)$$

Con estos datos, los valores a ingresar al canal de acceso del desarenador se detallan en la siguiente tabla.

Cuadro 6.7: Valores y parámetros para la condición de entrada

Parámetro	Valor
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Masa y momento	Flujo másico
Flujo másico	48 000 Kg/s
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen aire	0
Fracción en volumen agua	1

3. Salida de agua

En la siguiente tabla se muestra los valores a ingresar en la salida del desarenador, que corresponde a la tubería vertical denomina “pique”.

Cuadro 6.8: Valores y parámetros para la condición de salida

Parámetro	Valor
Tipo de condición de borde	Apertura (Opening)
Masa y momento	Presión de apertura y dirección
Presión relativa de la salida	0 Pa
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen aire	1
Fracción en volumen agua	0

4. Apertura hacia la atmósfera

En la siguiente tabla se muestra los valores a ingresar en la apertura hacia la atmósfera, correspondiente a la parte libre del canal de acceso, la transición del desarenador y a las naves de la misma.

Cuadro 6.9: Valores y parámetros para la condición de apertura hacia la atmósfera

Parámetro	Valor
Tipo de condición de borde	Apertura (Opening)
Masa y momento	Presión de apertura y dirección
Presión relativa de la salida	0 Pa
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen aire	1
Fracción en volumen agua	0

5. Condición de pared

La siguiente tabla muestra los valores a ingresar a la condición de pared, correspondiente al material de concreto del canal de acceso, transición del desarenador, naves del desarenador y a la tubería vertical.

Cuadro 6.10: Valores y parámetros para la condición de pared

Parámetro	Valor
Tipo de condición de borde	Pared (Wall)
Influencia de pared en el flujo	Sin deslizamiento
Rugosidad de pared	Pared rugosa
Valor de rugosidad	0,5 mm

6. Condiciones de simetría

Debido al que el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato es simétrico, se ha decidido simular la mitad de la estructura para reducir el costo computacional, para ello se ha considerado la condición de borde de simetría al plano que divide en dos partes iguales a la estructura a simular.

7. Condiciones de partida

La siguiente tabla muestra las condiciones de partida para el dominio.

Cuadro 6.11: Valores y parámetros para las condiciones de partida

Condiciones globales	
Condiciones de partida	
Tipo de velocidad	Cartesiana
Componentes de velocidad cartesiana	Automática
Presión estática	Automática
Turbulencia	Intensidad media (5%)

Convergencia de la simulación

El software Ansys presenta la plataforma CFX Solver, donde se puede visualizar las gráficas de los procesos iterativos. El Solver resuelve las ecuaciones de transporte de fluidos con todas las variables presentes. La interfaz genera graficas que están en función del número de iteraciones y de los residuos de las ecuaciones en el proceso iterativo. Para la simulación hidrodinámica se ha decidido colocar condiciones al solucionador que nos permitan obtener buenos resultados, la primera condición es que cuando los residuos de las ecuaciones sean menor a 1×10^{-4} el proceso iterativo debe culminar y la segunda condición es que el proceso iterativo no debe pasar de 1 000 iteraciones, para evitar el costo computacional originado por el valor del residuo constante de las ecuaciones.

En las siguientes figuras observamos las curvas residuales de la cantidad de movimiento en U, V y W (x, y, z) y la masa obtenida en el dominio en norma RMS, se puede apreciar que en las primeras 250 iteraciones de los valores residuales de las ecuaciones oscilan, luego se mantiene estable hasta llegar a la iteración 1 000. Además, las curvas residuales de cantidad de movimiento de U y V tienden a

aproximarse más al valor de convergencia debido a que sufren más agitaciones y cambios de dirección a lo largo de la estructura.

La curva residual de volumen (RMS P-vol) desarrolla oscilaciones más notorias, pero es la que alcanza el valor de convergencia con menos iteraciones. Además, se puede observar las gráficas de convergencia de las ecuaciones de turbulencia como la de fracción de volumen.

Figura 6.10: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y volumen con respecto a las iteraciones.

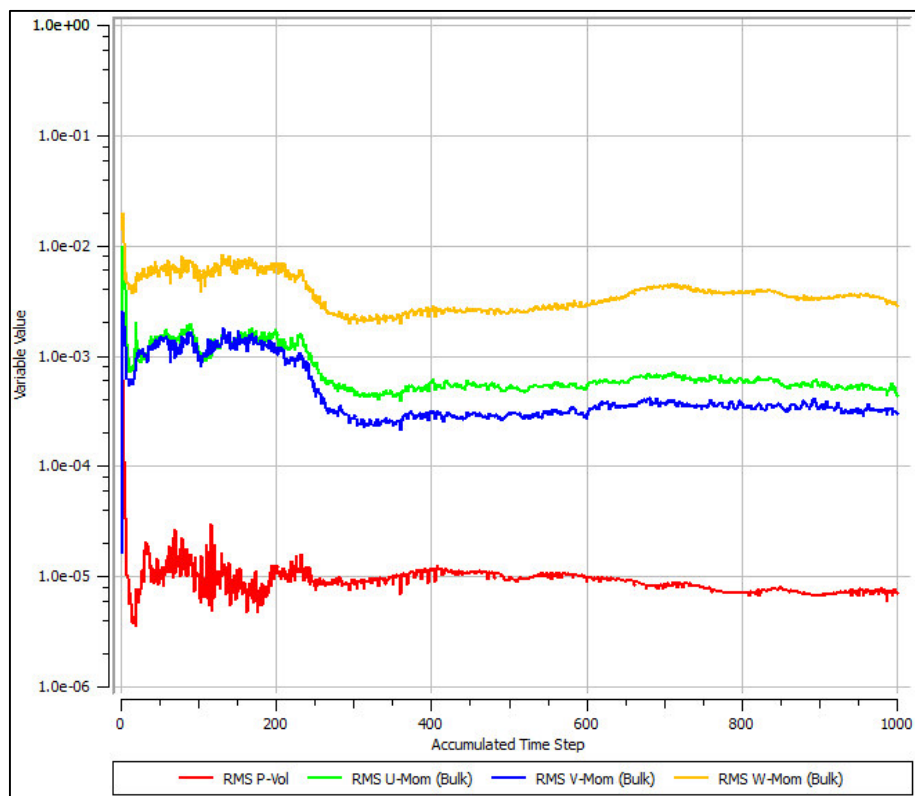


Figura 6.11: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones.

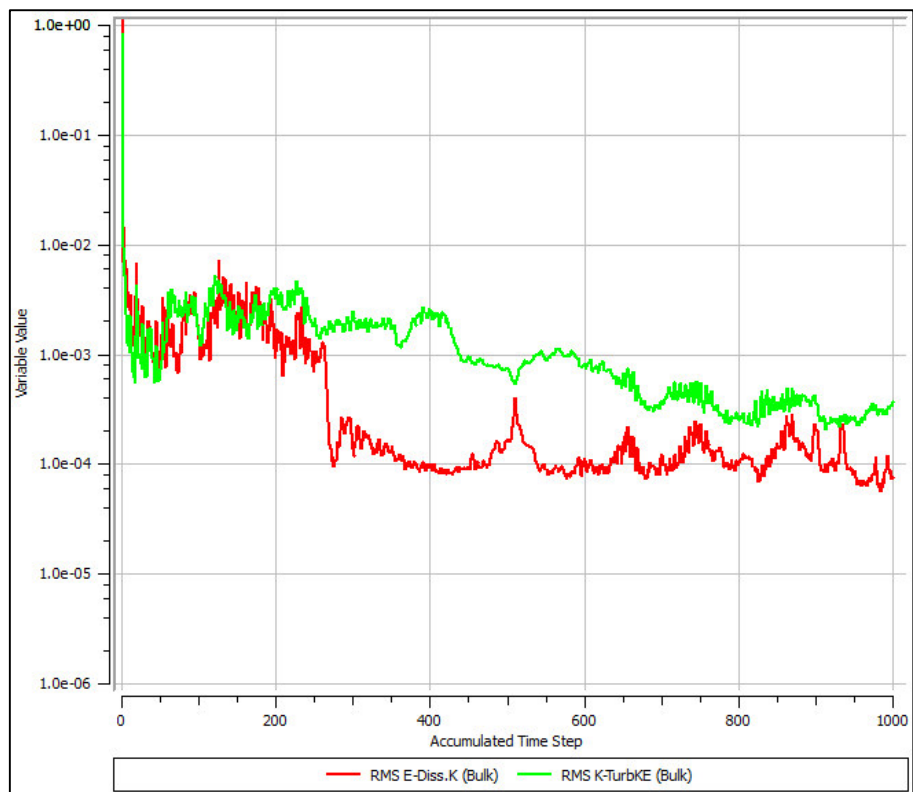
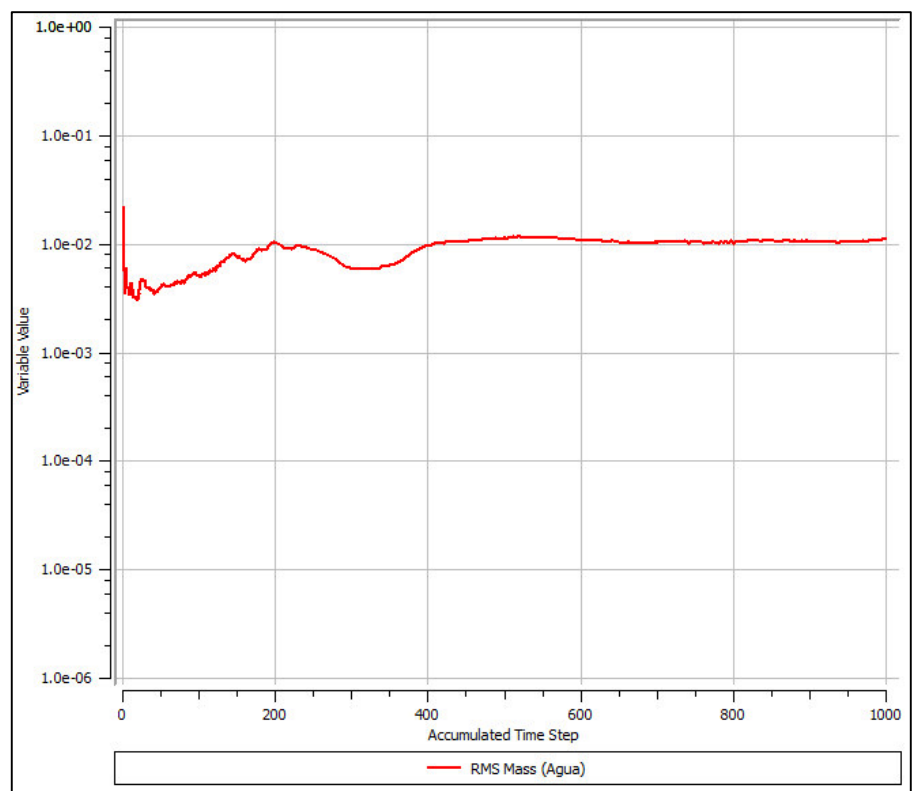


Figura 6.12: Valores residuales de fracción de volumen con respecto al número de iteraciones.



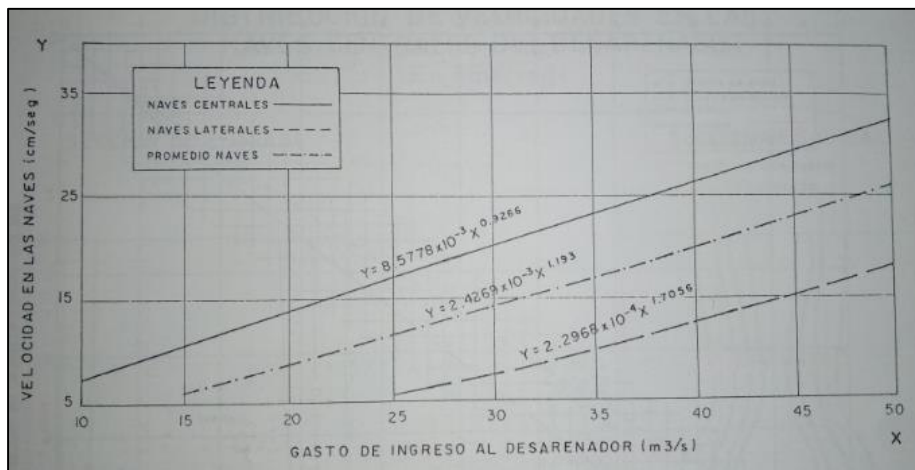
Validación del dominio discretizado

Para realizar la validación de la simulación hidrodinámica nos basamos en la discretización del dominio, que genera una cantidad de elementos que están en función del tamaño de estos mismos. Para eso se debe comparar los resultados de cada discretización del dominio con diferentes tamaños de elementos.

Según el Estudio de Transporte de Sedimentos elaborado por ELECTROPERU en 1985, muestra una gráfica donde se puede determinar la distribución de la velocidad de las naves en función del gasto total que ingresa al desarenador. Cabe recalcar que la gráfica del estudio descrito puede determinar las velocidades de las naves hasta un caudal de ingreso de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a que en el año del estudio la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato solo contaba con la bocatoma Principal, por lo que se decidió determinar la velocidad en la nave central y lateral con el caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que se presenta en los escenarios a simular.

Para determinar la velocidad de la nave central y lateral del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato para el caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ se ha utilizado la siguiente gráfica.

Gráfica 6.1: Distribución de la velocidad en las naves en función del gasto total que ingresa al desarenador (1985)



Entonces, para un caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ de ingreso al desarenador, se obtuvo una velocidad en la nave central de $0,2944 \text{ m}/\text{s}$, mientras que en la nave lateral de $0,1608 \text{ m}/\text{s}$. Estas velocidades obtenidas serán comparadas para realizar la validación del dominio discretizado.

Para comparar los valores de velocidad de la simulación numérica con los valores medidos in situ, se realizará la simulación hidrodinámica con diferentes tamaños de elementos. Para determinar la velocidad en las naves del desarenador a partir de la simulación numérica se procede a calcular el promedio de la velocidad media en la sección transversal en la entrada y salida de la nave, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$V_{promedio} = V_{entrada} + V_{salida} \quad (6.39)$$

Donde $V_{promedio}$ es la velocidad en las naves del desarenador en m/s, $V_{entrada}$ es la velocidad media de la sección transversal ubicada en la entrada de la nave en m/s y V_{salida} es la velocidad media de la sección transversal ubicada a la salida de la nave en m/s.

Una vez calculado la velocidad promedio en las naves se procede a calcular el error con respecto a la velocidad medida in situ, por lo que el porcentaje es nuestro indicativo para validar la discretización del dominio.

$$\% Error = \frac{V_{promedio} - V_{in situ}}{V_{in situ}} \quad (6.40)$$

Se procedió a realizar la simulación hidrodinámica para la nave central con los diferentes tamaños de elementos, obteniendo los siguientes resultados.

Cuadro 6.12: Calibración del dominio discretizado en función de la velocidad media de la nave central.

Calibración - Nave Central					
Discretización		Velocidades			Error
Tamaño (m)	Elementos (und)	Entrada (m/s)	Salida (m/s)	Promedio (m/s)	
0,400	2 152 979	0,2952	0,1692	0,2322	22,44
0,350	3 097 625	0,2610	0,1695	0,2153	28,11
0,300	4 719 939	0,3208	0,2644	0,2926	2,27
0,275	6 099 444	0,2773	0,2838	0,2806	6,30
0,250	7 949 946	0,3142	0,2593	0,2868	4,23

De la misma manera se realizó la simulación hidrodinámica para la nave lateral, obteniendo los siguientes resultados.

Cuadro 6.13: Calibración del dominio discretizado en función de la velocidad media de la nave lateral.

Calibración - Nave Lateral					
Discretización		Velocidades			Error
Tamaño (m)	Elementos (und)	Entrada (m/s)	Salida (m/s)	Promedio (m/s)	
0,300	4 731 496	0,1788	0,1159	0,1474	8,36
0,275	6 196 411	0,1420	0,1114	0,1267	21,21
0,250	8 001 538	0,1383	0,0957	0,1170	27,24

Como podemos observar en los dos cuadros, el tamaño del elemento que presenta menor error con respecto a información medida in situ, es el de 0,3 m, tanto para la simulación hidrodinámica en la nave central como en la lateral. Por lo que se concluye que el tamaño de 0,3 m de los elementos que conforman el dominio, garantizan una buena discretización del dominio a simular, y así determinar buenas aproximaciones de los resultados para los diferentes caudales a simular.

6.4.2. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería

Dominio del problema

Para desarrollar el Segundo escenario de la Simulación Hidrodinámica se construye la geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato como una propuesta de mejora, eso quiere decir que se presenta la geometría del desarenador sin las tabiquerías centrales y laterales.

Se consideró para la simulación numérica solo la mitad de la geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, debido a que la geometría presenta simetría por lo que el costo computacional se reduce.

Las dimensiones de la geometría a simular, son las mismas dimensiones de la geometría utilizada en el Escenario 1 de la Simulación Hidrodinámica, con la excepción de que no se encuentran las tabiquerías centrales ni laterales.

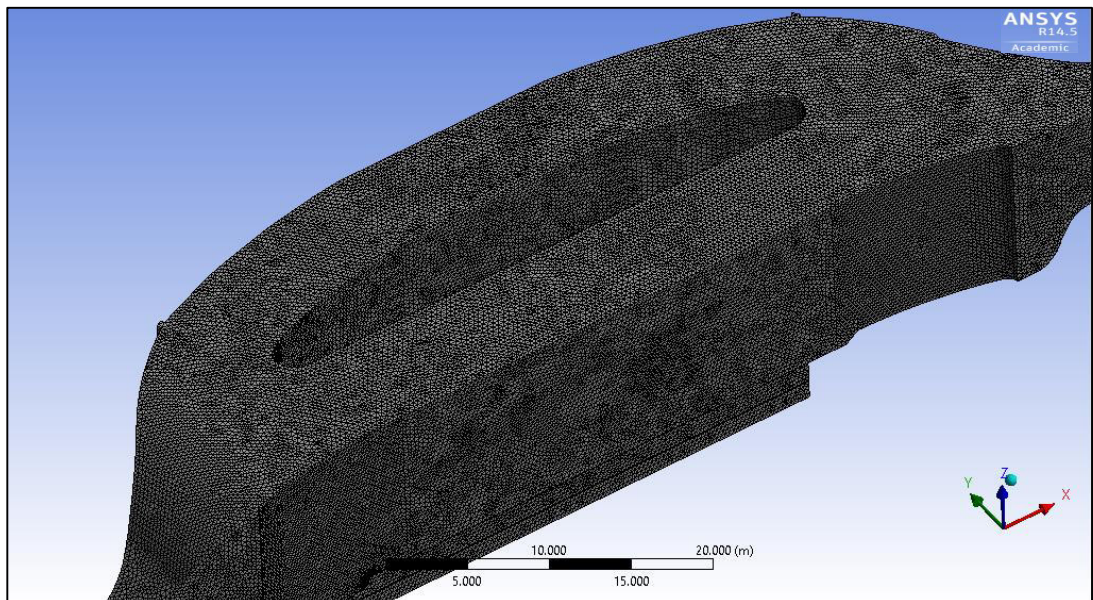
Como se explicó anteriormente, el módulo *DesignModeler* permite importar la geometría del desarenado en extensión x_b, para ello se tuvo que construir la geometría en la plataforma 3D Modeling del software AutoCAD.

Discretización del dominio

Para la discretización del dominio del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin las tabiquerías, nos basaremos en la validación del dominio discretizado del Escenario 1 de la Simulación Hidrodinámica. Donde se observa en el Cuadro 6.12 que el tamaño de 0,30 m de los elementos que conforman la discretización del dominio presentan una buena aproximación, con un porcentaje de error de 2,27% con respecto a la velocidad media de la nave central, de la misma manera se puede visualizar en el Cuadro 6.13 que el tamaño de 0,30 m del elemento genera un error 8,36% con respecto a la velocidad media de la nave lateral. Por lo que se ha decidido realizar la discretización de la geometría del Escenario 2 con un tamaño de elementos de 0,30 m, debido a que el dominio presenta las mismas dimensiones.

En el módulo *Meshing* se utilizó la herramienta *Body Sizing* en donde divide el dominio a simular en pequeños elementos tetraédricos, en esta ocasión el tamaño de los elementos a utilizar es de 0,30 m, además se generó un mallado no estructurado debido a la complejidad de la geometría. Para el tamaño de elemento designado se ha generado 4 781 134 elementos tetraédricos que conforman el dominio.

Figura 6.13: Discretización del desarenador sin tabiquería en las naves de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato



Condiciones de contorno

1. Detalles del dominio

Los detalles del dominio son los mismos que se utilizaron en el Escenario 1 de la simulación hidrodinámica, los valores y parámetros del dominio lo encontramos en el Cuadro 6.3.

2. Entrada de agua

Los tirantes de agua a utilizar en el canal de acceso del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquería en las naves, son los mismos valores cálculos en el Escenario 1, estos tirantes lo encontramos en el Cuadro 6.4, Cuadro 6.5, y Cuadro 6.6, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Los valores y parámetros para la condición de entrada se encuentran en el Cuadro 6.7.

3. Salida de agua

Los valores y parámetros para la condición de entrada se encuentran en el Cuadro 6.8, que corresponde a la tubería vertical.

4. Apertura hacia la atmósfera

Los valores y parámetros para la condición de apertura hacia la atmósfera se encuentran en el Cuadro 6.9, correspondiente a la parte libre del canal de acceso, la transición del desarenador y las naves.

5. Condición de pared

Los valores y parámetros para la condición de pared se encuentran en el Cuadro 6.10, correspondiente al material de concreto del canal de acceso, transición del desarenador, naves del desarenador y a la tubería vertical.

6. Condiciones de simetría

Debido a la extracción de las tabiquerías en las naves del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, la estructura en su totalidad presenta simetría, por este

motivo se puede simular la mitad de la estructura para reducir el costo computacional. Para ello se ha considerado la condición de borde de simetría al plano que divide en dos partes iguales a la estructura a simular.

7. Condiciones de partida

Los valores y parámetros para las condiciones de partida del dominio se encuentran en el Cuadro 6.11.

Convergencia de la simulación

Para la simulación hidrodinámica del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería en las naves, se ha determinado condiciones al solucionador que nos permita obtener buenos resultados, las condiciones son que cuando los residuos de las ecuaciones sean menor a 1×10^{-4} el proceso debe culminar, y la otra condición es que el proceso iterativo no debe sobrepasar de 500 iteraciones, para evitar el costo computacional por el valor del residuo constante de las ecuaciones.

En las figuras se observan las curvas residuales de la cantidad de movimiento en U, V y W (x, y, z) y la masa obtenida en el dominio en norma RMS, podemos observar que en las primeras 300 iteraciones de los valores residuales de las ecuaciones oscilan, luego se vuelve constante hasta llegar a la iteración 500. De la misma manera se puede observar que las curvas residuales de cantidad de movimiento de U y V tienden a aproximarse más al valor de convergencia debido a que sufren más agitaciones y cambios de dirección a lo largo de la estructura.

La curva residual de volumen (RMS P-vol) desarrolla oscilaciones más notorias en las primeras 300 iteraciones, luego su valor tiende ser constante hasta la iteración 500. Además, se puede observar las gráficas de convergencia de las ecuaciones de turbulencia como la de fracción de volumen.

Figura 6.14: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y volumen con respecto a las iteraciones

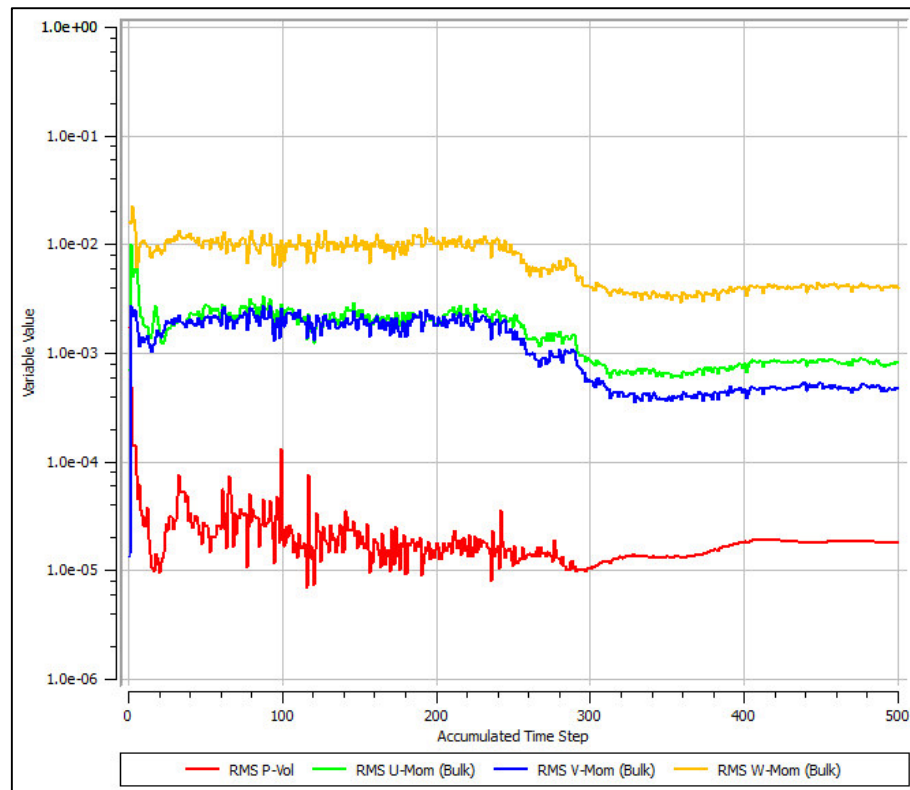


Figura 6.15: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones

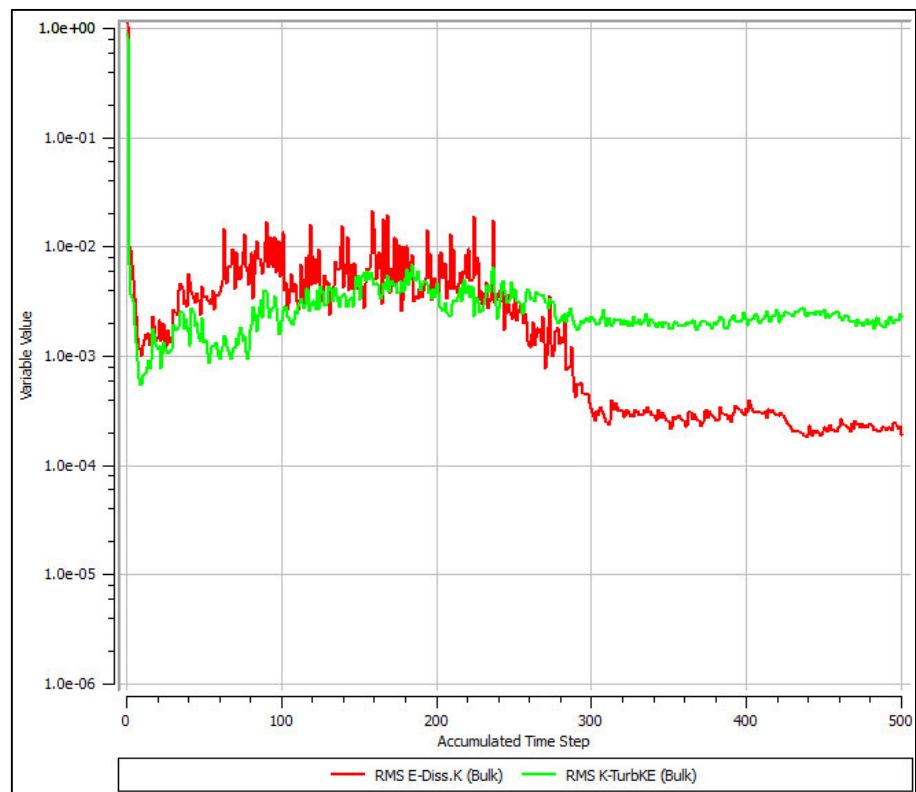
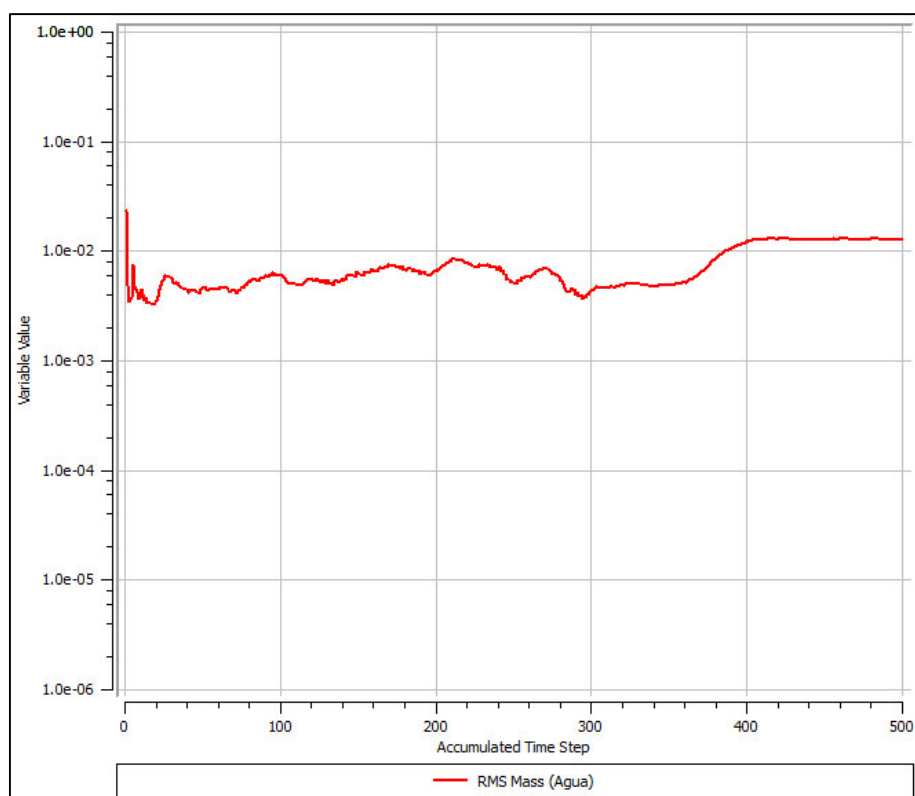


Figura 6.16: Valores residuales de fracción de volumen con respecto al número de iteraciones



6.5. Simulación de transporte de sedimentos

6.5.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería

Dominio del problema

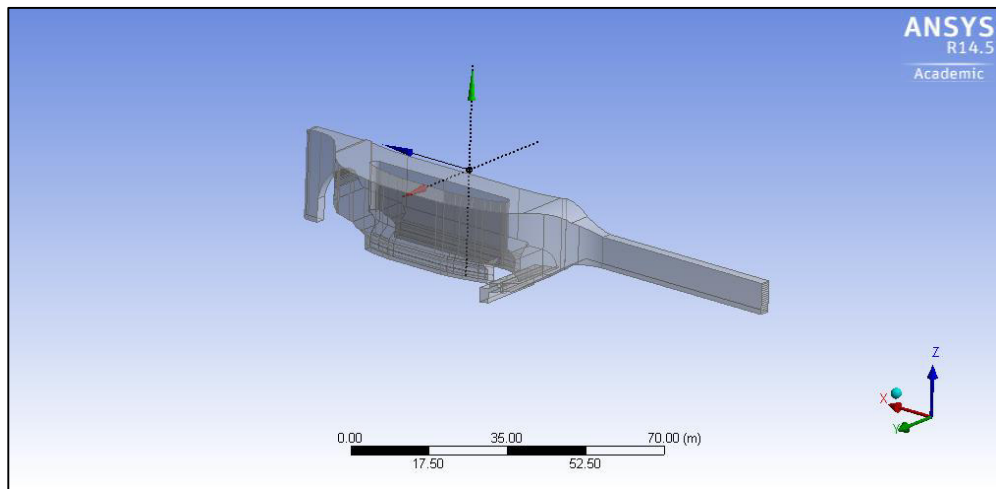
Para la simulación de transporte de sedimentos en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, debido a la complejidad de las dimensiones que presenta la tabiquería central y lateral a lo largo de las naves, es decir, a los agujeros que presenta internamente la tabiquería a lo largo de su longitud que permite la decantación de los sedimentos, se ha decidido trabajar la simulación de transporte de sedimentos sin la tabiquería en las naves central y lateral, esto se debe al tema de costo computacional y a los alcances del presente estudio.

La simulación de transporte de sedimentos va de la mano con la simulación hidrodinámica de los diferentes escenarios, debido a que la simulación hidrodinámica define la interfaz agua – aire, más conocida como superficie libre, dentro de la estructura a simular. Entonces, definida la interfaz en cada una de los escenarios se

procedió a realizar el corte de la geometría mediante un plano que se encuentra ubicado en la interfaz, con la finalidad de obtener la geometría en donde ingresan los dos elementos de interés, agua y sedimento. A continuación, se explicará el procedimiento para definir el dominio del problema.

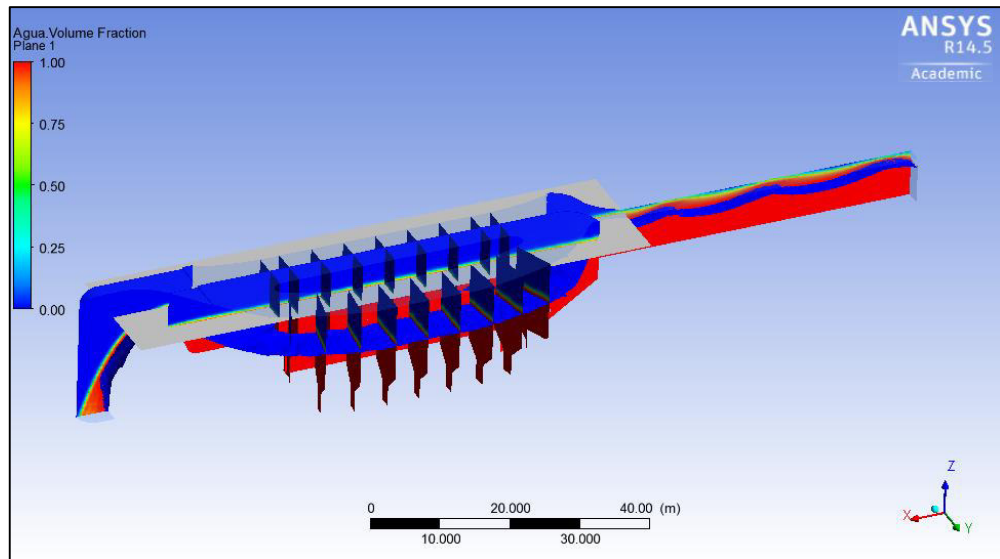
Se muestra la geometría de la estructura utilizada para la simulación hidrodinámica para los diferentes escenarios planteados.

Figura 6.17: Geometría del desarendor de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquería en las naves



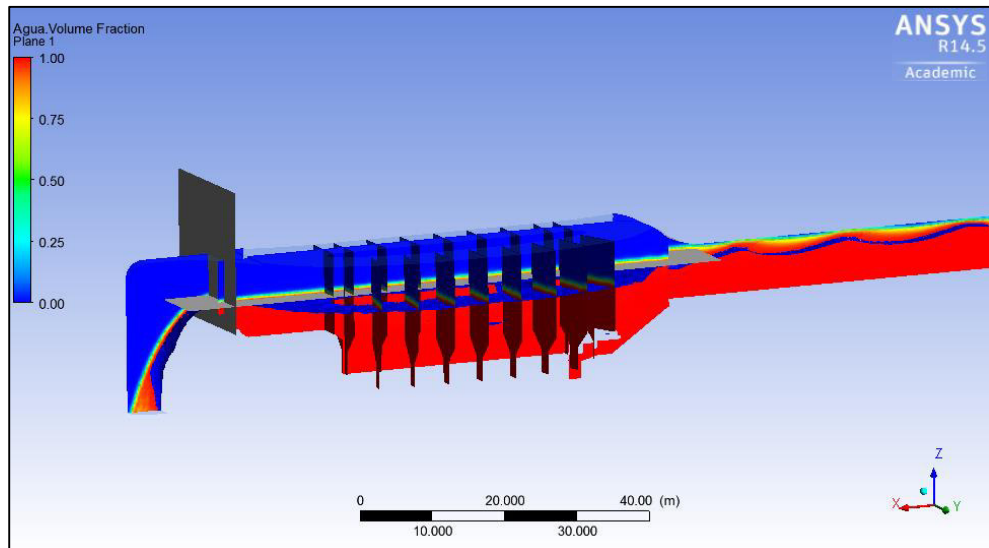
La simulación hidrodinámica realizada a los diferentes escenarios nos define la interfaz agua – aire, superficie libre, para realizar el corte de la geometría se coloca un plano XY en el eje Z, para obtener solo la geometría donde ingresará el caudal con las partículas suspendidas.

Figura 6.18: Plano XY en el eje Z que corta la superficie libre en la estructura simulada



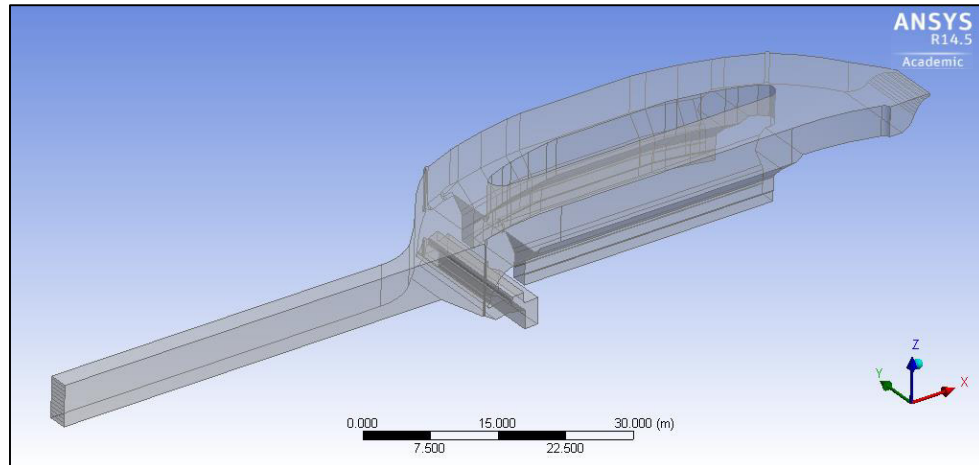
Además, se va incorporar un plano YZ en el eje X, ubicado en la cresta del vertedero, para definir los límites de nuestro dominio de interés para cuantificar el transporte de sedimentos dentro de la estructura a simular, como se muestra a continuación.

Figura 6.19: Ubicación del plano YZ en el eje X en la cresta del vertedero



El resultado de cortar la geometría por los planos ubicados dentro de la estructura a simular nos delimita el dominio del problema que se utiliza para la simulación de transporte de sedimentos, donde los elementos involucrados son el agua y las partículas suspendidas.

Figura 6.20: Geometría del desarenador a utilizar para la simulación de transporte de sedimentos para un caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$



Cabe recalcar que el procedimiento de ubicación de los planos en la interfaz agua – aire y en la cresta del vertedero, y el corte de la geometría delimitando el dominio de interés se ha realizado para la simulación hidrodinámica de los caudales en estudio, estos $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$; con el fin de obtener el dominio del problema para la simulación de transporte de sedimentos para los caudales mencionados anteriormente.

Discretización del dominio

La discretización del dominio del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquerías en las naves para la simulación de transporte de sedimentos se va realizar de la misma manera como se ha realizado para la simulación hidrodinámica, eso quiere decir, que se utiliza la herramienta *Body Sizing* que ofrece el módulo *Meshing* del software Ansys, esta herramienta divide el volumen de la geometría del desarenador en pequeños elementos tetraédricos que se adaptan a la geometría provocando un mallado no estructurado.

Para determinar una buena discretización del dominio de la geometría a simular se ha comparado dos tamaños de elementos, estos son, $0,30 \text{ m}$ y $0,25 \text{ m}$, estos valores fueron determinados a partir de la simulación hidrodinámica debido que para un tamaño de malla de $0,30 \text{ m}$ los errores fueron mínimos con respecto a mediciones realizadas en campo, y el valor de $0,25 \text{ m}$ se escogió porque genera una discretización más aproximada al continuo, que permite obtener mejores resultados debido a que

analiza el transporte de sedimentos. En la etapa de validación se determina cual de los dos tamaños generan mayor aproximación con los valores obtenidos en campo.

A continuación, se muestra el número de nodos y elementos tetraédricos en función del tamaño de los elementos, para las diferentes geometrías que se determinaron en función de la superficie libre con los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

Cuadro 6.14: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal 48 m³/s

Mallado - Q = 48 m ³ /s		
Tamaño (m)	Cantidad	
	Elementos	Nodos
0,300	2 325 331	421 094
0,250	3 854 621	688 563

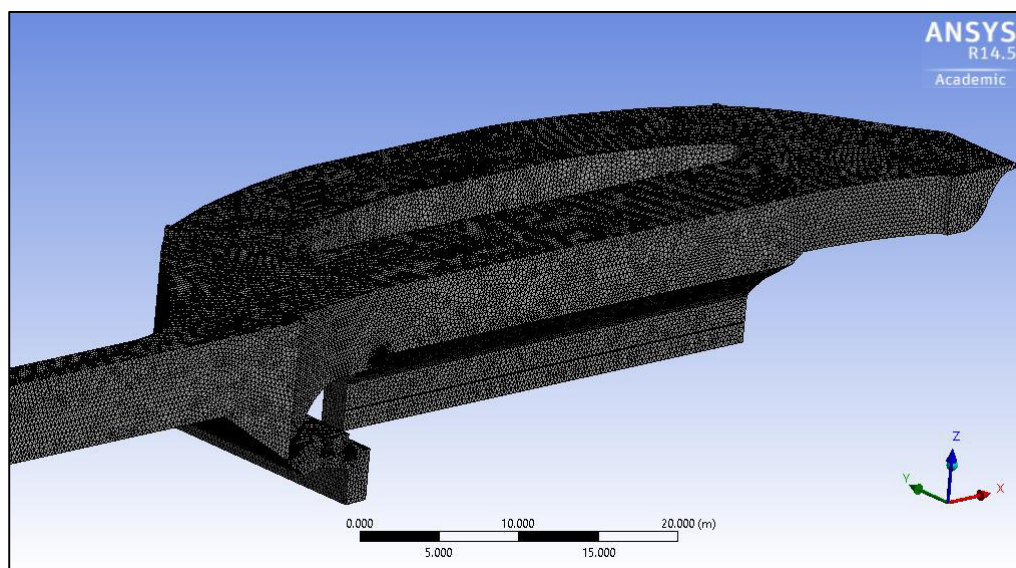
Cuadro 6.15: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal 72 m³/s

Mallado - Q = 72 m ³ /s		
Tamaño (m)	Cantidad	
	Elementos	Nodos
0,250	4 510 705	6 207 641

Cuadro 6.16: Discretización en función del tamaño del elemento – Caudal 80 m³/s

Mallado - Q = 80 m ³ /s		
Tamaño (m)	Cantidad	
	Elementos	Nodos
0,250	4 567 292	6 284 036

Figura 6.21: Discretización de la geometría del desarenador para la simulación de transporte de sedimentos para un caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$



Condiciones de contorno

1. Detalles del dominio

Para definir los detalles del dominio para la simulación de transporte de sedimentos se tiene que definir las propiedades del sedimento a decantar, para ello nos basamos en el Estudio de Transporte de Sedimentos elaborado por ELECTROPERU en 1985.

Además, el software Ansys CFX permite ingresar materiales al dominio, definiendo el tipo de material y propiedades del material, como la densidad. A continuación, se muestran estos valores a considerar.

Cuadro 6.17: Detalles del material insertado – Partícula de sedimento

Material	
Nombre	Sand One Way Coupled
Tipo de material	Partícula sólida
Propiedades del material	
Densidad	$2\,650 \text{ Kg/m}^3$

Ahora se va a establecer la distribución del diámetro de partícula para el dominio, para ello el software Ansys CFX ofrece diferentes tipos de distribuciones. Como el software no permite ingresar valores de granulometría, se ha escogido la distribución *Normal de diámetro de partículas*, que represente los valores de la granulometría a

ingresar al dominio. Esta opción usa una distribución normal de diámetros de partícula centrados alrededor de un diámetro medio especificado. La forma de la distribución normal está determinada por la desviación estándar especificada. Los diámetros máximo y mínimo se usan para recortar la distribución normal⁴⁷.

Entonces para determinar el diámetro medio, mínimo, máximo y la desviación estándar de la distribución de las partículas en el dominio, se ha utilizado el Análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión y por arrastre de fondo transportados en el río Santa – Periodo: Avenidas 1985, expresada en la Tabla 5.7 del Capítulo 5 de este trabajo. A continuación, se muestra valores de análisis mecánico por tamizado de sólidos en suspensión en la Entrada del desarenador y los cálculos estadísticos para obtener los parámetros de la distribución a ingresar al dominio.

Cuadro 6.18: Cálculo estadístico del análisis mecánico por tamizado de sólidos de suspensión de la entrada del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

Material	Tamaño (mm)	Desarenador Entrada (%) f_i	m_i	$f_i \times m_i$	$f_i \times m_i^2$
Arena gruesa	[1,0000 - 0,5000]	0,10	0,75000	0,0750	0,056250
Arena media	[0,5000 - 0,2500]	1,40	0,37500	0,5250	0,196875
Arena fina	[0,2500 - 0,1250]	7,00	0,18750	1,3125	0,246094
Arena muy fina	[0,1250 - 0,0625]	15,20	0,09375	1,4250	0,133594
Limo grueso	[0,0625 - 0,0320]	22,00	0,04725	1,0395	0,049116
Limo medio	[0,0320 - 0,0160]	13,80	0,02400	0,3312	0,007949
Limo fino	[0,0160 - 0,0080]	16,80	0,01200	0,2016	0,002419
Arcilla	[0,0080 - 0,0010]	22,80	0,00450	0,1026	0,000462

Para determinar la desviación de datos agrupados por intervalos, primero debemos calcular la varianza, para lo tanto se tiene.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \times m_i^2}{n} - \bar{x}^2 \quad (6.41)$$

Donde k es el número de intervalos, m_i es el promedio del valor inferior y superior de cada rango, n es el número de datos, f_i es la frecuencia absoluta y \bar{x} es la media, realizando las operaciones se tiene:

⁴⁷ (Ansys, 2011)

$$k = 8, \quad n = 99,10, \quad \sum_{i=1}^k f_i \times m_i = 5,0124, \quad \sum_{i=1}^k f_i \times m_i^2 = 0,692758$$

Luego, la varianza

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \times m_i^2}{n} - \bar{x}^2 = \frac{0,692758}{99,10} - \left(\frac{5,0124}{99,10}\right)^2 = 0,004432$$

La desviación estándar es:

$$S = \sqrt{0,004432} = 0,066575$$

El módulo Ansys CFX ofrece dos opciones de acoplamiento para los pares de fluidos de partículas, pueden ser partículas *completamente acopladas* al fluido o pueden estar *acopladas a una sola dirección*. Las partículas totalmente acopladas, intercambian impulso con la fase continua, donde el flujo continuo afecta a las partículas y viceversa. Mientras, que el acoplamiento unidireccional simplemente predice las trayectorias de las partículas como un proceso posterior basado en el campo de flujo y, por lo tanto, no influyen en el campo de flujo de fase continua⁴⁸.

Se ha escogido el acoplamiento completo para obtener mejores resultados, porque es necesario para predecir los efectos en el campo de flujo de fase continua, a pesar que tiene un costo computacional más alto que el acoplamiento unidireccional.

El siguiente cuadro muestra los detalles del dominio para la simulación de transporte de sedimentos para los diferentes escenarios.

⁴⁸ (Ansys, 2011)

Cuadro 6.19: Valores y parámetros del dominio.

Características Generales	
Condiciones Básicas	
Tipo de dominio	Dominio fluido
Lista de fluidos	Agua, Partículas
Definición de fluidos y partículas	
Agua	
Material	Agua
Morfología	Fluido continuo
Partícula	
Material	Sand One Way Coupled
Morfología	Transporte de partícula sólida
Distribución de diámetro de partícula	Normal in Diameter by Number
Diámetro mínimo	0,001 mm
Diámetro máximo	1 mm
Diámetro medio	0,0506 mm
Desviación estándar	0,0665 mm
Modelos del dominio	
Presión de referencia	1 atm
Opción Flotabilidad	Boyante
Gravedad en x	0
Gravedad en y	0
Gravedad en z	- g
Densidad boyante de referencia	1,185 Kg/m ³
Modelos de los fluidos	
Turbulencia	k-epsilón
Función de pared	Escalable (scalable)
Detalles de los fluidos	
Agua	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Partículas	
Morfología	Transporte de partícula sólida
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Modelo de erosión	Finnie
Pares de fluidos	
Agua - Partículas	
Acoplamiento de partículas	Totalmente acoplado
Transferencia de momento	Schiller - Naumann

2. Entrada de agua y sedimento

Los caudales a utilizar en el canal de acceso del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquería en las naves para la simulación de transporte de sedimentos son de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s. Cabe recalcar que los caudales a ingresar en la condición de entrada deben expresarse en flujo másico.

Ahora describiremos las propiedades y comportamientos de las partículas⁴⁹:

Masa y momento: se va a utilizar la opción *Velocidad de deslizamiento cero*, que significa que las partículas se inyectan a la velocidad local de la fase continua.

⁴⁹ (Ansys, 2011)

Posición de partícula: se va a utilizar la opción de *Inyección uniforme*, que permite la inyección aleatoria en toda la entrada.

Número de posiciones: este parámetro establece el número total de partículas que se inyecta, en donde se puede expresar el número directamente.

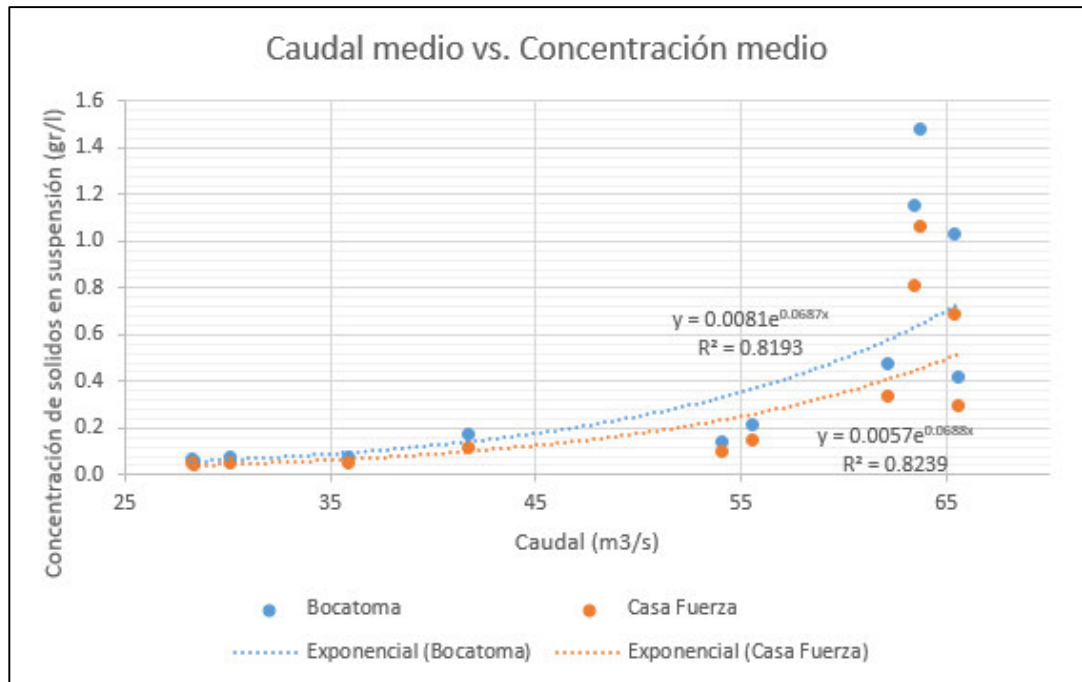
Tasa de flujo de masa de partículas: especifica la tasa de flujo másico que se comparte entre todas las partículas. Esta debería ser la tasa de flujo de masa total de partículas a través de este límite. Para el cálculo de la tasa de flujo de masa de partículas nos basaremos en la información medida por la empresa administradora de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato para el periodo 2005 – 2016, en donde se ha obtenido el caudal y concentraciones de sólidos en suspensión en el sistema bocatoma – desarenador - turbinas, información que es muy útil para determinar la tasa de flujo de masa de partículas que ingresan al desarenador. A continuación, se muestra el promedio mensual en el periodo establecido de caudales y concentración en el sistema bocatoma – desarenador - turbinas.

Cuadro 6.20: Promedio mensual de caudal que es captado en la bocatoma y concentración media medidos en la bocatoma y Casa Fuerza de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, periodo 2005-2016.

Meses	Caudal (m ³ /s)	Concentración (gr/l)	
	Captado	Bocatoma	Turbinado
Enero	65,5380	0,4159	0,3002
Febrero	65,4058	1,0291	0,6856
Marzo	63,7299	1,4843	1,0677
Abril	63,4385	1,1531	0,8115
Mayo	54,0769	0,1401	0,0999
Junio	35,9072	0,0741	0,0525
Julio	28,4053	0,0631	0,0433
Agosto	28,2499	0,0671	0,0478
Septiembre	30,1266	0,0755	0,0536
Octubre	41,7256	0,1713	0,1208
Noviembre	55,5297	0,2123	0,1522
Diciembre	62,1043	0,4728	0,3397

Realizamos la gráfica que relaciona los dos parámetros medidos en el sistema bocatoma – desarenador - turbina, para determinar una función que nos permita determinar la concentración a partir del caudal que ingresa a la bocatoma y posteriormente al desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

Gráfica 6.2: Relación del caudal captado y concentración media en la Bocatoma y Casa Fuerza.



En función del caudal de 48 m³/s determinamos la concentración a partir de la ecuación exponencial para la Bocatoma.

$$c = 0.0081e^{0.0687Q} \quad (6.42)$$

Donde, c es la concentración de sólidos en suspensión en gr/l y Q es el caudal que ingresa a la estructura del desarenador en m³/s.

Entonces para un caudal de 48 m³/s, le corresponde una concentración de 0,2190 gr/l. Ahora determinamos la tasa de flujo de masa de partículas con la siguiente ecuación.

$$c = \frac{q_s}{Q} \quad (6.43)$$

Donde q_s es la tasa de flujo masa de partículas en Kg/s, c es la concentración de sólidos en suspensión en Kg/m³ y Q es el caudal en m³/s.

El valor de la tasa de flujo de masa de partículas que ingresa a la estructura del desarenador es 10,51 Kg/s para un caudal de 48 m³/s.

A continuación, se detalla los valores y parámetros de la condición de entrada.

Cuadro 6.21: Valores y parámetros para la condición de entrada

Condiciones básicas	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Detalles de condiciones de borde	
Masa y momento	Flujo másico
Flujo másico	4 8000 Kg/s
Valores de fluidos	
Propiedades de Partículas	
Masa y momento	Velocidad de deslizamiento cero
Posición de partícula	Inyección uniforme
Número de posiciones	5 000 (Especificación directa)
Tasa de flujo de masa de partículas	10,51 Kg/s

3. Condición de pared

Los valores y parámetros para la condición de pared se encuentran en el Cuadro 6.10, correspondiente al material de concreto del canal de acceso, transición del desarenador, naves del desarenador y a la tubería vertical.

4. Condiciones de simetría

Debido a la extracción de las tabiquerías en las naves del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, la estructura en su totalidad presenta simetría, por este motivo se puede simular la mitad de la estructura para reducir el costo computacional. Para ello se ha considerado la condición de borde de simetría al plano que divide en dos partes iguales a la estructura a simular.

5. Condiciones de partida

Los valores y parámetros para las condiciones de partida del dominio se encuentran en el siguiente cuadro.

Figura 6.22: Valores y parámetros para la condiciones de partida.

Condiciones globales	
Condiciones de partida	
Tipo de velocidad	Cartesiana
Componentes de velocidad cartesiana	Automática
Presión estática	Automática
Turbulencia	Intensidad media (5%)

Convergencia de la simulación

Para la simulación de transporte de sedimentos se ha decidido colocar condiciones al solucionador que nos permita obtener buenos resultados, la primera condición es que cuando los residuos de las ecuaciones sean menor a 1×10^{-4} el proceso iterativo debe detenerse, y la segunda condición es que el proceso iterativo no deba sobrepasar de las 500 iteraciones, para evitar el costo computacional originado por el valor del residuo constantes de las ecuaciones.

En las siguientes figuras, observamos las curvas residuales de la cantidad de movimiento en U, V, y W (x, y, z) y la masa obtenida en el dominio en norma RMS. Se puede apreciar que en las 40 primeras iteraciones los valores residuales oscilan, pero siempre descendiendo hacia el valor de 1×10^{-4} , luego se mantiene estable hasta la iteración 250.

La curva residual de masa (RMS P-Mass) alcanza rápidamente el valor de convergencia con muy pocas iteraciones. Además, se puede observar las gráficas de convergencia de las ecuaciones de turbulencia.

Figura 6.23: Valores residuales de las ecuaciones de cantidad de movimiento y masa con respecto a las iteraciones.

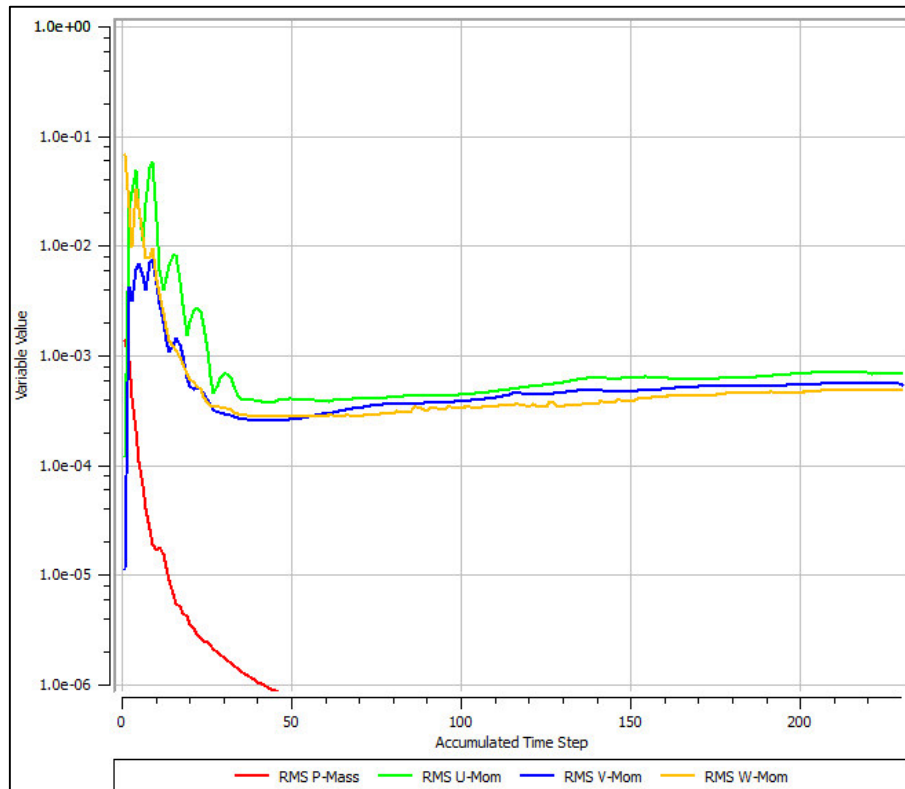
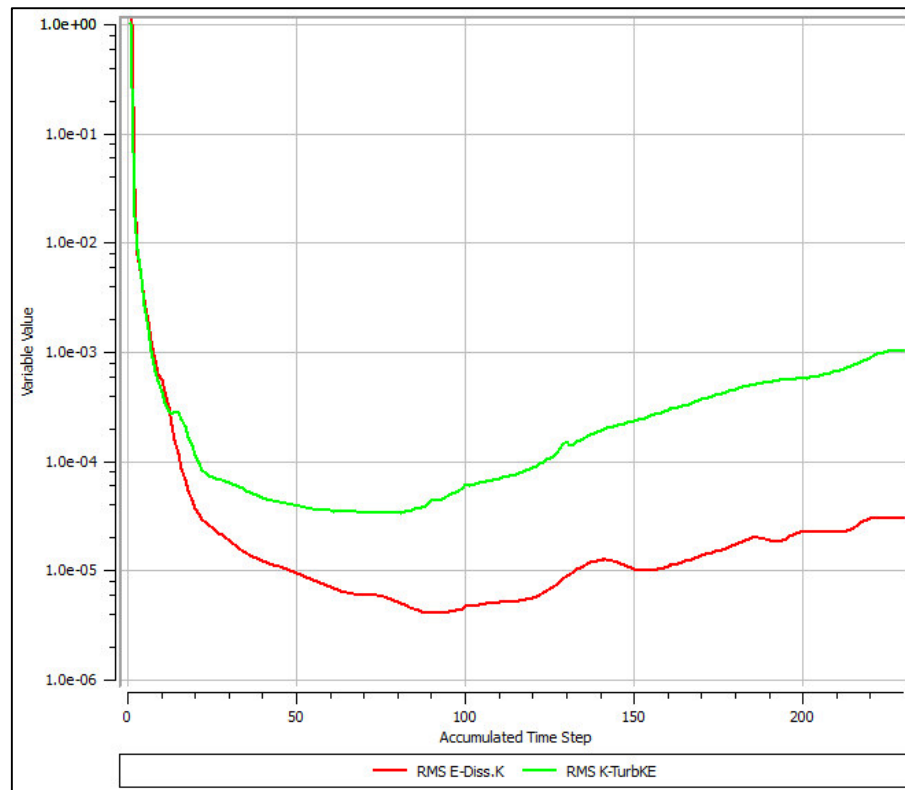


Figura 6.24: Valores residuales de las ecuaciones de turbulencia con respecto al número de iteraciones.



Validación del dominio discretizado

Para realizar la validación de los resultados de la simulación de transporte de sedimentos nos basamos en la discretización del dominio, que están en función del tamaño de los elementos que conforman el dominio. Para eso se debe comparar los resultados de cada discretización del dominio con diferentes tamaños de elementos.

El parámetro a comparar para la validación de los resultados de la propuesta del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería es la concentración media en la sección de la entrada y salida del desarenador, para ello nos apoyaremos con la información de la concentración media en la bocatoma y Casa Fuerza, adjunta en el Cuadro 6.20, para ello utilizaremos la gráfica que se encuentra en la Figura 6.23, donde se relaciona el caudal y la concentración media en la bocatoma y Casa Fuerza.

Para determinar la concentración media en la entrada del desareandor a partir del caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, se utiliza la ecuación 6.42, dando como resultado una concentración de $0,2190 \text{ gr/l}$.

Para determinar la concentración a la salida del desarenador utilizamos la ecuación que ajusta la curva con una ecuación exponencial (Casa Fuerza), la ecuación es:

$$c = 0.0057e^{0,0688Q} \quad (6.44)$$

Donde, c es la concentración de sólidos en suspensión en gr/l y Q es el caudal que ingresa a la estructura del desarenador en m³/s. Entonces para un caudal de 48 m³/s la concentración a la salida del desarenador es de 0,1549 gr/l.

Con estos valores de concentración media en la sección transversal de la entrada y salida del desarenador se procede a realizar la comparación de resultados de la simulación de transporte de sedimentos para el desarenador sin tabiquerías de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

La simulación de transporte de sedimentos en el módulo Ansys CFX nos da como resultado la fracción de volumen en la sección transversal en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería.

La fracción de volumen se expresa así:

$$Fv_s = \frac{V_s}{V_w} \quad (6.45)$$

Donde, Fv_s es la fracción de volumen de sedimento, V_s es el volumen de sedimento y V_w es el volumen de agua.

Expresamos la concentración de sedimentos de la siguiente manera.

$$c = \frac{W_s}{V_w} \quad (6.46)$$

Donde, c es la concentración de sedimentos en Kg/m³, W_s es el peso del sedimento en Kg y V_w es el volumen de agua en m³.

También, expresamos la densidad del sedimento, de la siguiente manera.

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (6.47)$$

Donde ρ_s es la densidad del sedimento en Kg/m³ y V_s es el volumen del sedimento.

Donde relacionamos la ecuación 6.45 y 6.47.

$$Fv_s = \frac{V_s}{V_w} = \frac{W_s}{\rho_s V_w}$$

Ahora reemplazamos la ecuación 6.46.

$$Fv_s = \frac{c}{\rho_s}$$

Entonces podemos calcular la concentración en función del volumen de fracción y densidad del sedimento, con la siguiente ecuación.

$$c = Fv_s \times \rho_s \quad (6.48)$$

El valor de la densidad del sedimento a simular se detalla en el Cuadro 6.17, este valor es 2 650 Kg/m³.

Mediante la simulación de transporte de sedimentos para los dos tamaños de elementos de 0,30 m y 0,25 m y con un caudal de ingreso a la estructura del desarenador de 48 m³/s, se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 6.22: Calibración del dominio discretizado en función de la concentración media en la sección transversal de la entrada y salida del desarenador sin tabiquería.

Calibración - Desarenador sin tabiquería					
Discretización		Concentración			
Tamaño (m)	Elementos (und)	Entrada (Kg/m ³)	Error (%)	Salida (Kg/m ³)	Error (%)
0,300	2 325 331	0,2335	6,61	0,1421	8,27
0,250	3 854 621	0,2054	6,20	0,1457	5,94

Como se puede observar en el cuadro 6.22, el tamaño de elementos que presenta menor error con respecto a la información medida en in situ, es el de 0,25 m. Por lo que se concluye que el tamaño de 0,25 m de los elementos que conforman en dominio, garantiza una buena discretización del dominio a simular, y así determinar buenas aproximaciones de los resultados para los diferentes caudales a simular.

7. RESULTADOS

7.1. Análisis del patrón de flujo

7.1.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería existente

La validación de los resultados realizados en el Capítulo 6, para la Simulación Hidrodinámica en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe, donde se compara la velocidad media en la sección transversal de interés en función del tamaño de elementos que genera la discretización del dominio, para ello se compararon los resultados de la simulación hidrodinámica con el Estudio de Transporte de Sedimentos elaborado por ELECTROPERU en 1985. A partir de la comparación se determinó que el tamaño de elemento de 0,30 m que conforma la discretización de dominio, presenta resultados muy aproximados con respecto a la información medida in situ. Cabe recalcar que este tamaño de elemento fue aplicado para la discretización del dominio de todos los escenarios a simular, esto es para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

A continuación, se muestra los resultados de la simulación hidrodinámica, de velocidad media en la entrada y salida de las naves centrales y laterales del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente para los diferentes caudales propuestos en este trabajo.

Cuadro 7.1: Velocidad media en la sección transversal en la entrada y salida del desarenador con tabiquería para diferentes caudales de ingreso

Caudal de ingreso (m ³ /s)	Nave Central		Nave Lateral	
	Entrada (m/s)	Salida (m/s)	Entrada (m/s)	Salida (m/s)
48	0,3208	0,2644	0,1788	0,1159
72	0,3611	0,3512	0,3068	0,1858
80	0,4026	0,3769	0,2253	0,1731

En el Cuadro 7.1, podemos observar que las velocidades medias en la entrada y en la salida del desarenador son mayores en las naves centrales que en las naves laterales, esto se debe a la geometría que presenta el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, esto se puede corroborar en las Conclusiones y Recomendaciones

del Estudio de Transporte de Sedimentos elaborado por ELECTROPERU, que dice lo siguiente:

La distribución de velocidades del agua en las naves no es uniforme. Las velocidades en las naves centrales son mayores que en las naves laterales, esto se debe a que las naves laterales por su curvatura ofrecen mayor resistencia al flujo que las naves centrales; además, la transición pequeña y el pronunciado ensanchamiento antes de las naves del desarenador, generan turbulencia y vorticidad, cuyo efecto impide la distribución uniforme de la corriente.

En las siguientes figuras se presentan los resultados de la simulación hidrodinámica del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente, donde se presentan los resultados de fracción de volumen, perfiles de velocidad y contornos de velocidad, para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

Superficie libre

En las figuras se representan la fracción de volumen para la interfaz agua – aire para los tres caudales mencionados anteriormente. A partir de ello se puede identificar la superficie libre dentro de la estructura del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con tabiquería, en la parte izquierda de cada figura se muestra el rango de valores de la fracción de volumen de agua.

Figura 7.1: Superficie libre del desarenador con tabiquerías para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$

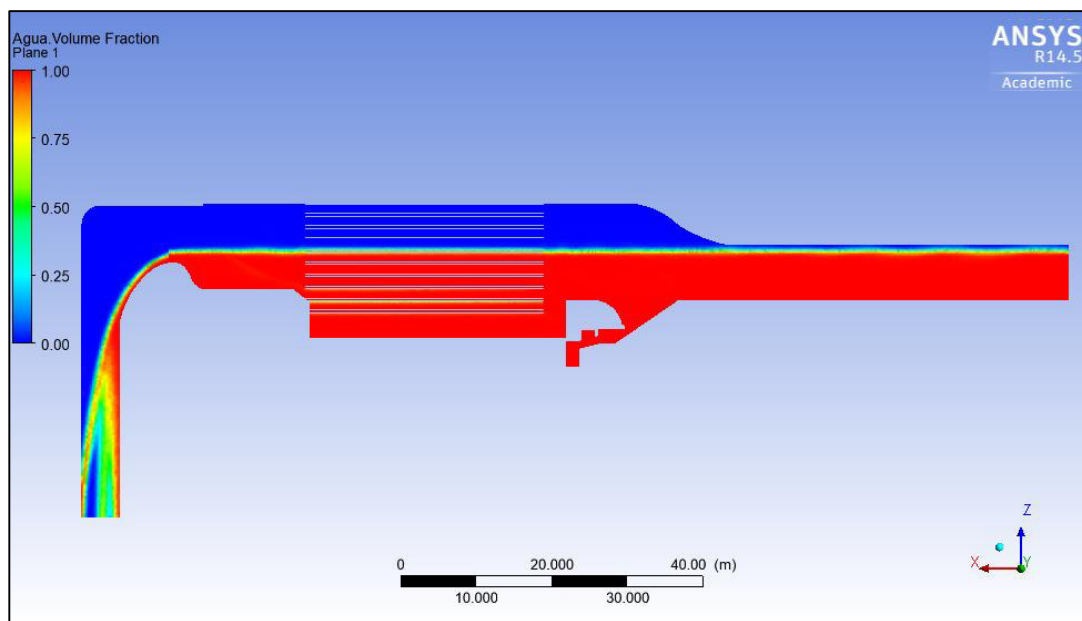


Figura 7.2: Superficie libre del desarenador con tabiquería para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$

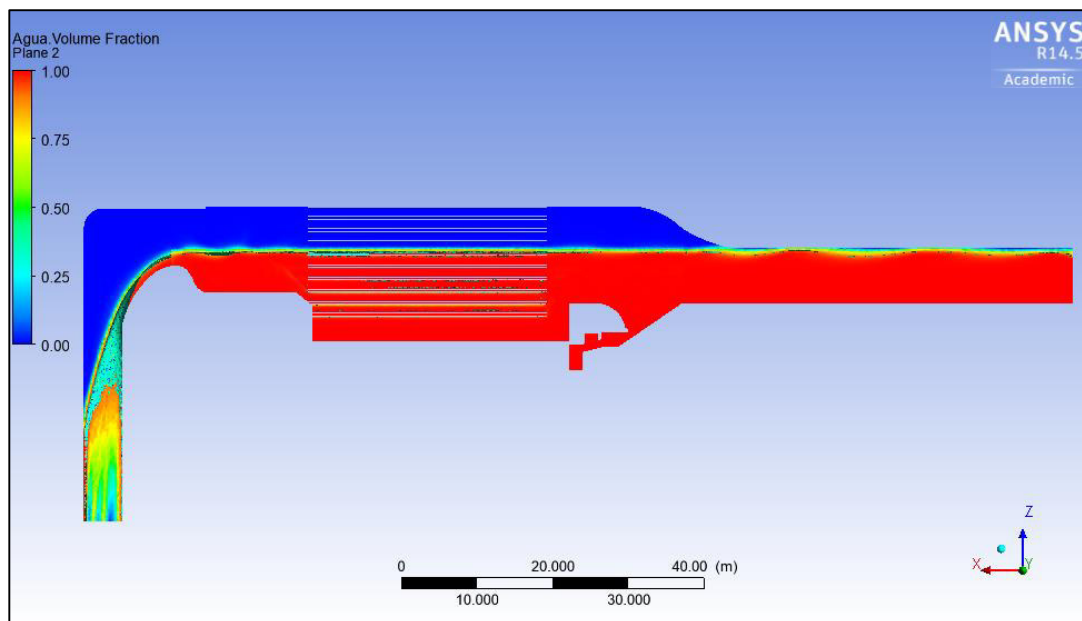
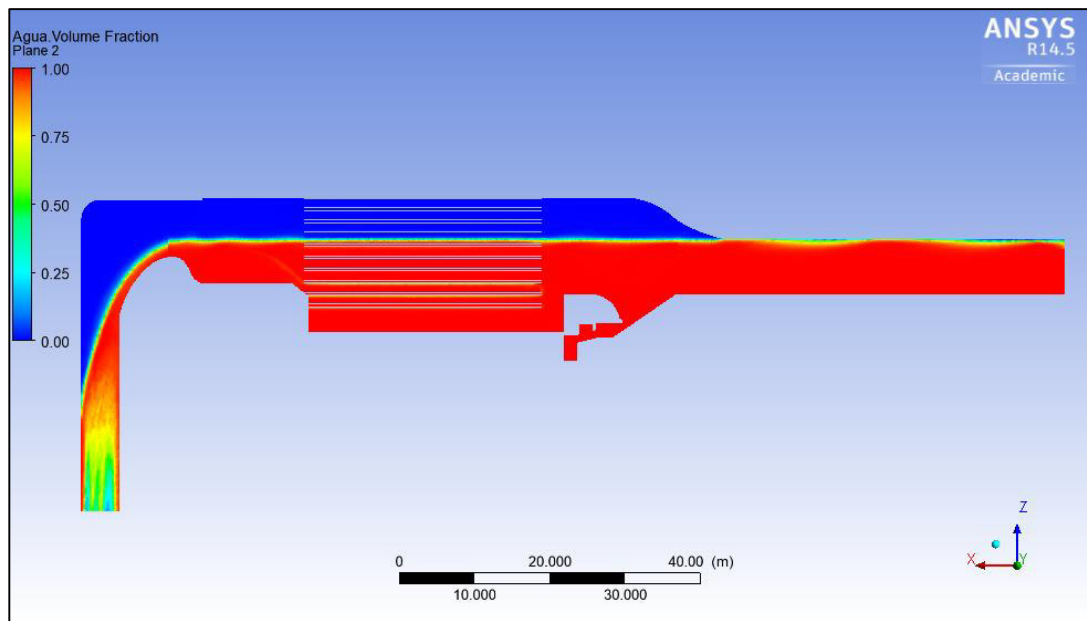


Figura 7.3: Superficie libre del desarenador con tabiquería para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$



Vectores de velocidad

Se presentan los resultados de los vectores de velocidad en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con tabiquería, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$, en diferentes proyecciones para poder interpretar los resultados obtenidos.

- **Vista en planta**

Las siguientes figuras muestran los vectores de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador con la tabiquería. Donde se observar que en el canal de acceso al desarenador las líneas de corriente se distribuyen de forma uniforme en todo su largo y no se forman flujos preferenciales o vórtices.

Además, se percibe que las naves centrales tienen mayor velocidad del flujo que las naves laterales, esto se debe a que las naves centrales se encuentran en la misma dirección que el canal de acceso al desarenador, por lo que los vectores de velocidad tienen la tendencia de ir hacia el centro del desarenador, otro punto es que la transición pequeña no permite uniformizar el flujo en todas las naves. Cabe recalcar que dentro de la tabiquería de la nave central, los diedros que presentan mayor velocidad se encuentran cerca del plano de simetría del desarenador. La vorticidad se encuentra presente en la entrada de la nave lateral y los valores picos de velocidad

se encuentran en la cresta del vertedero, ubicada en la confluencia de las salidas de las naves centrales y laterales.

Figura 7.4: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central para $Q = 48$ m^3/s – Vista en planta

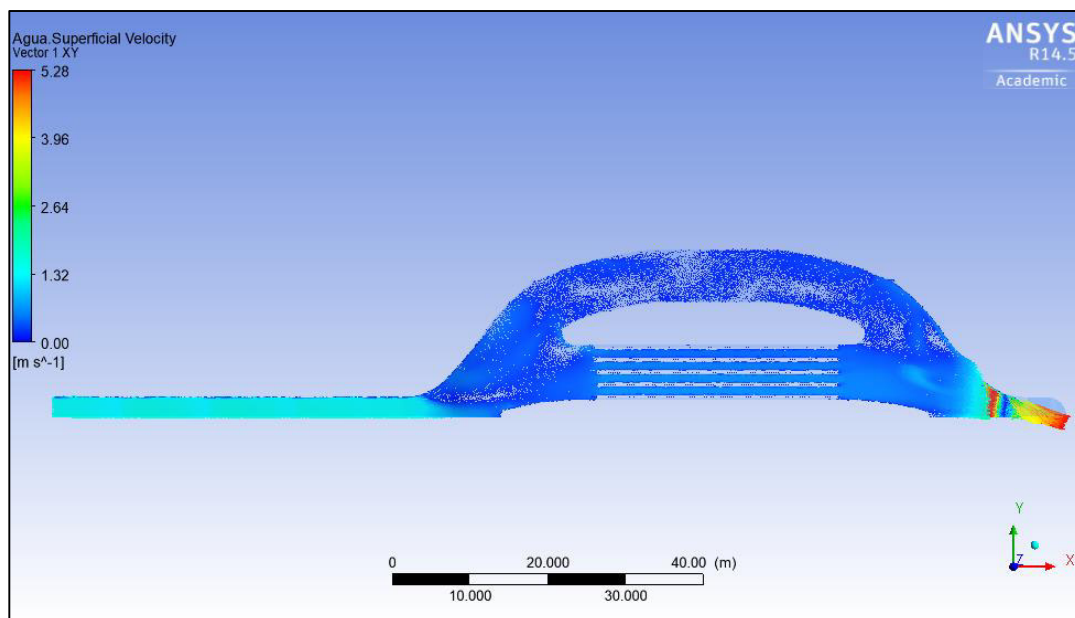


Figura 7.5: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral para $Q = 48$ m^3/s – Vista en planta

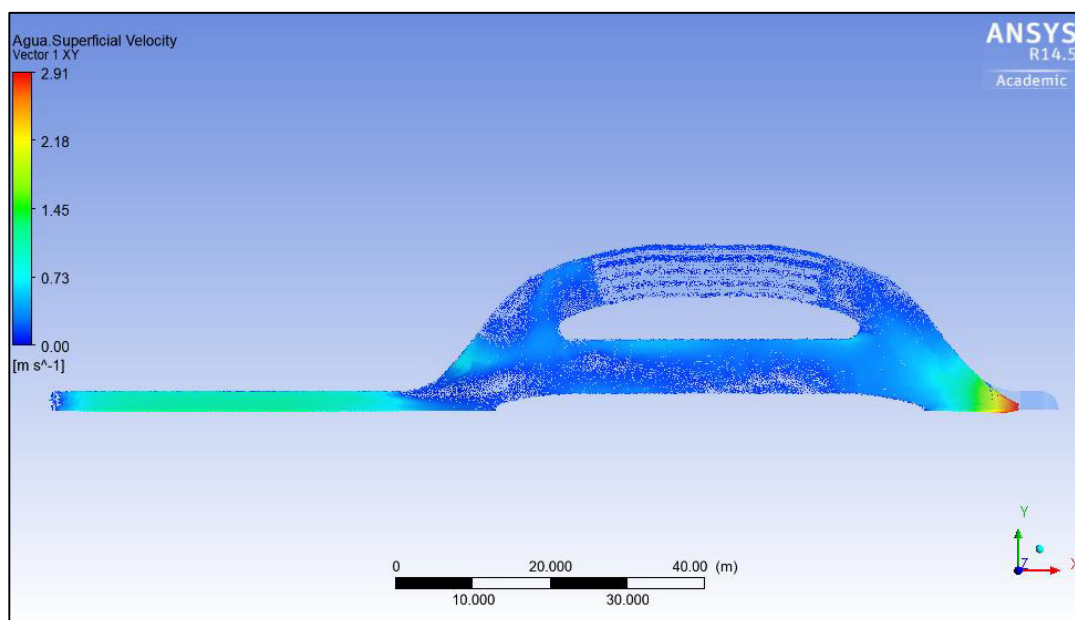


Figura 7.6: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central para $Q = 72$ m^3/s – Vista en planta

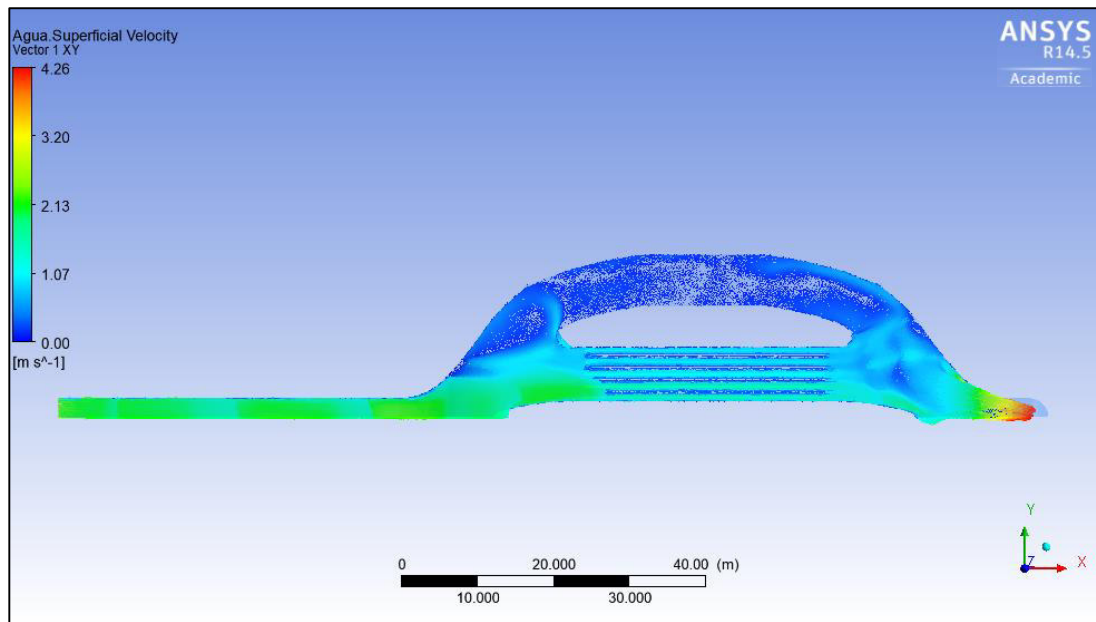


Figura 7.7: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72$ m^3/s – Vista en planta

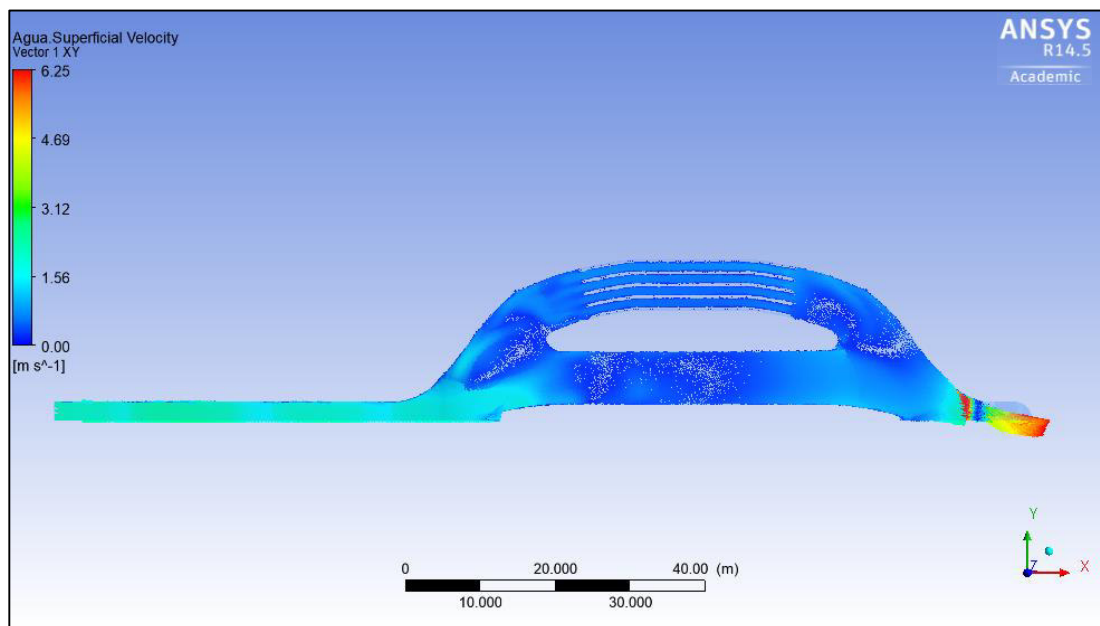


Figura 7.8: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 80$ m^3/s – Vista en planta

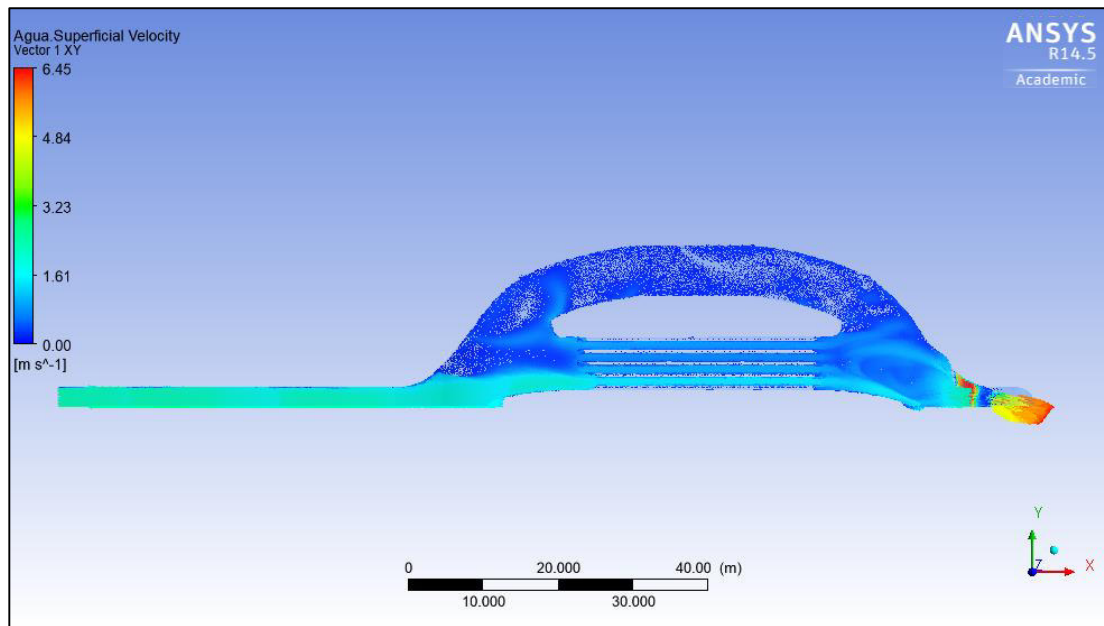
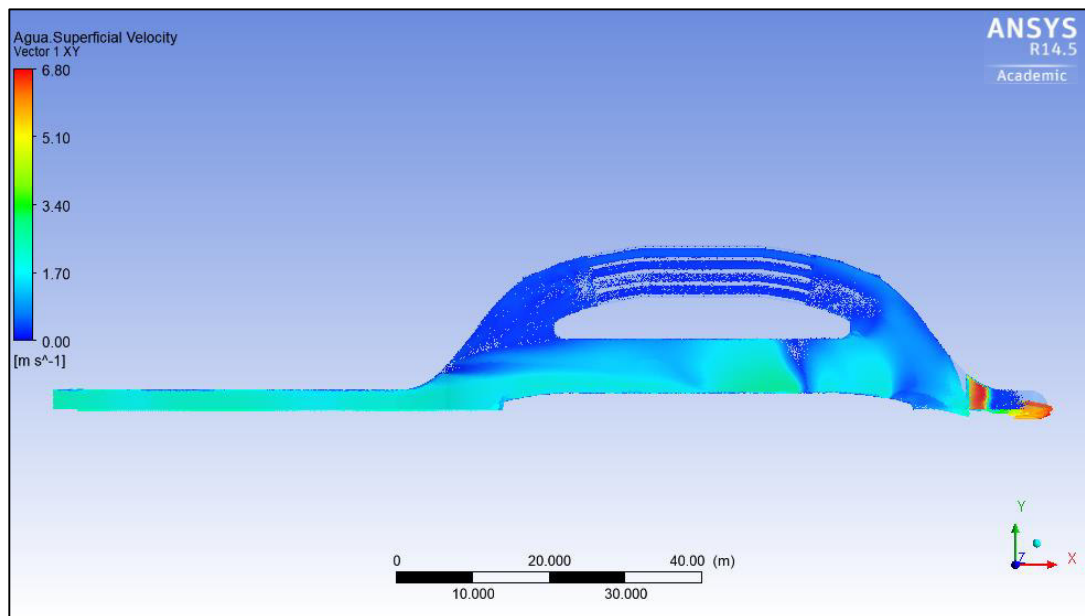


Figura 7.9: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80$ m^3/s – Vista en planta



- **Vista longitudinal**

Las siguientes figuras representan los vectores de velocidad, desde una vista longitudinal de las naves centrales y laterales del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s. En cada una de las figuras se puede apreciar en la parte derecha el canal de acceso al desarenador y la transición, mientras que la parte izquierda se observa la tubería de presión vertical, denominada “pique”, por lo que la dirección de flujo de agua va desde la derecha hacia la izquierda.

En la tabiquería de la nave central, se observa que los diedros que superiores adquieren mayor velocidad que los diedros que se encuentran en la parte baja de la tabiquería.

En la tabiquería de la lateral, se observa una situación diferente que en la tabiquería de la nave central, debido a que los diedros que se encuentran en la parte inferior de la tabiquería adquieren mayor velocidad que los diedros que se encuentran en la parte superior.

Además, los vectores de velocidad a la entrada de las naves centrales y laterales con tabiquería no se distribuyen de manera uniforme y a medida que aumenta el caudal de entrada al desarenador se presentan mayor número de vórtices.

Figura 7.10: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 48$ m^3/s – Vista longitudinal

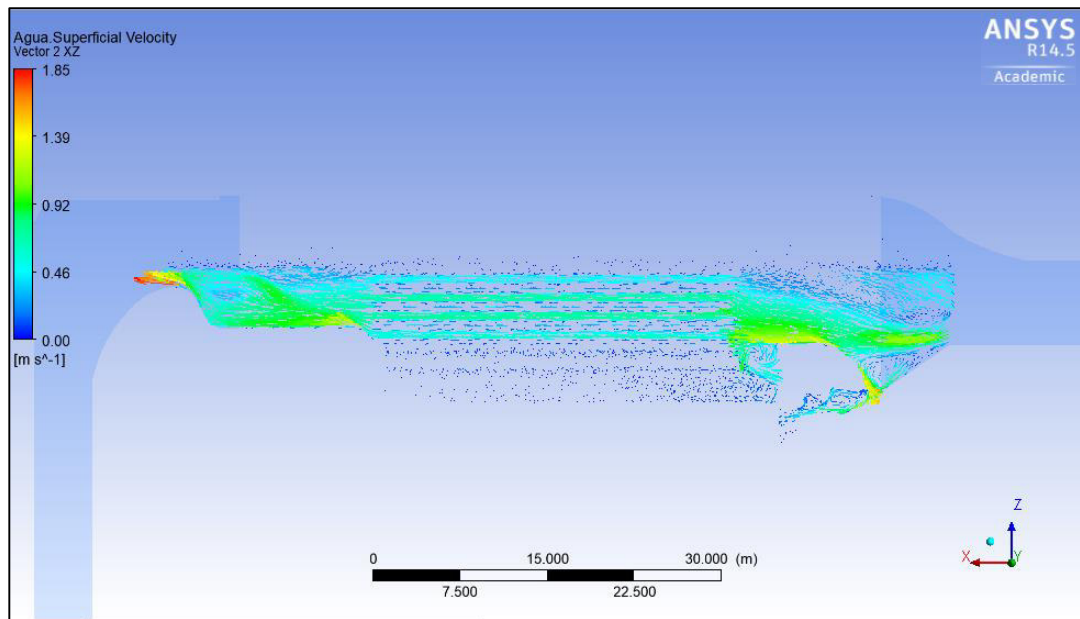


Figura 7.11: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48$ m^3/s – Vista longitudinal

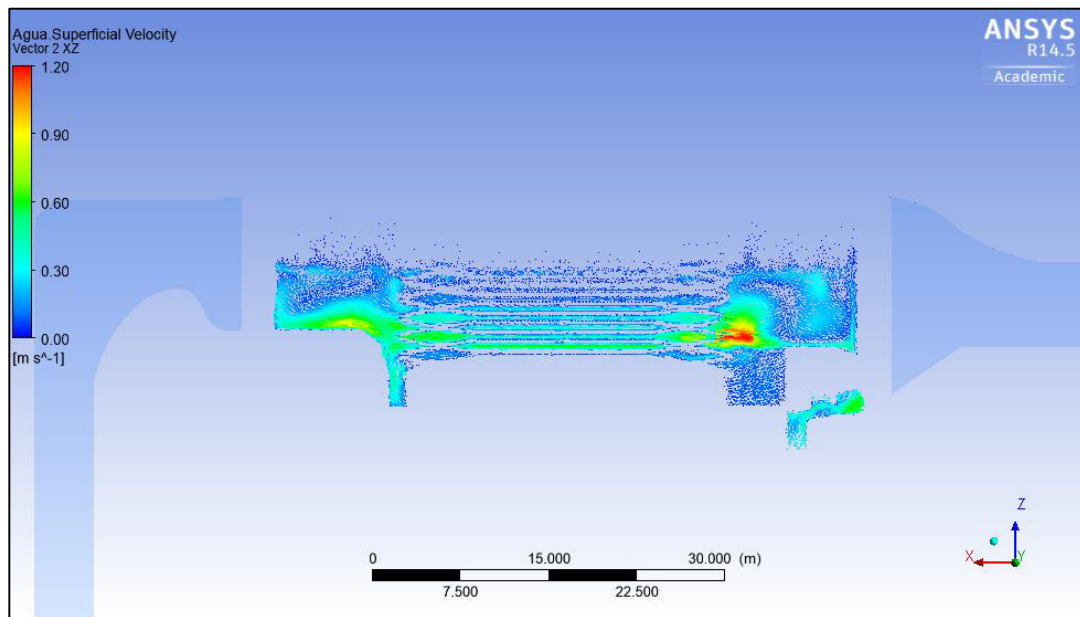


Figura 7.12: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72$ m^3/s – Vista longitudinal

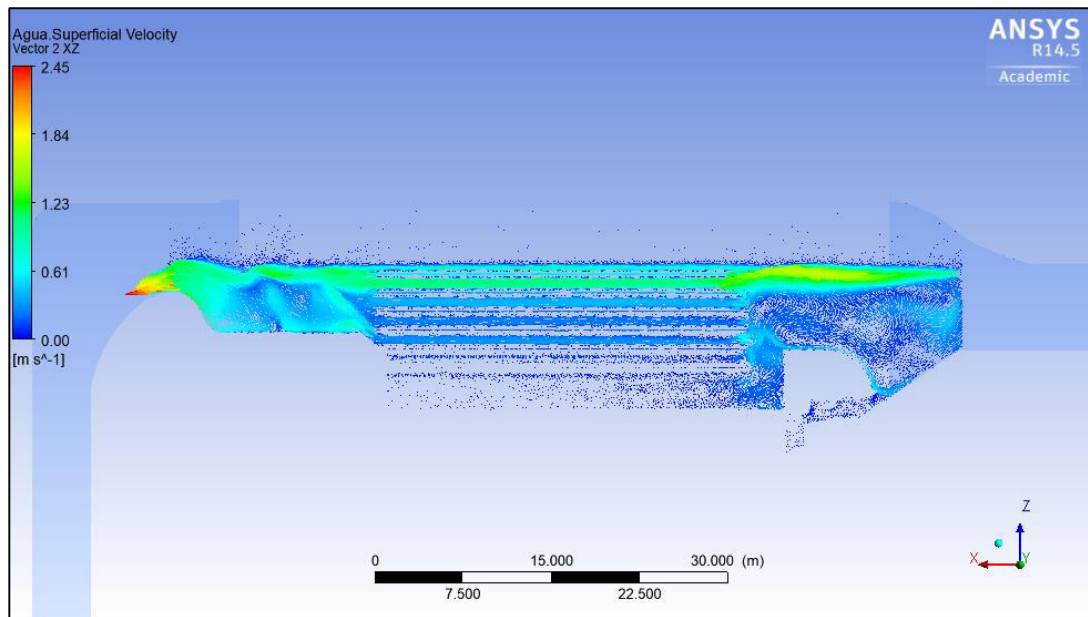


Figura 7.13: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72$ m^3/s – Vista longitudinal

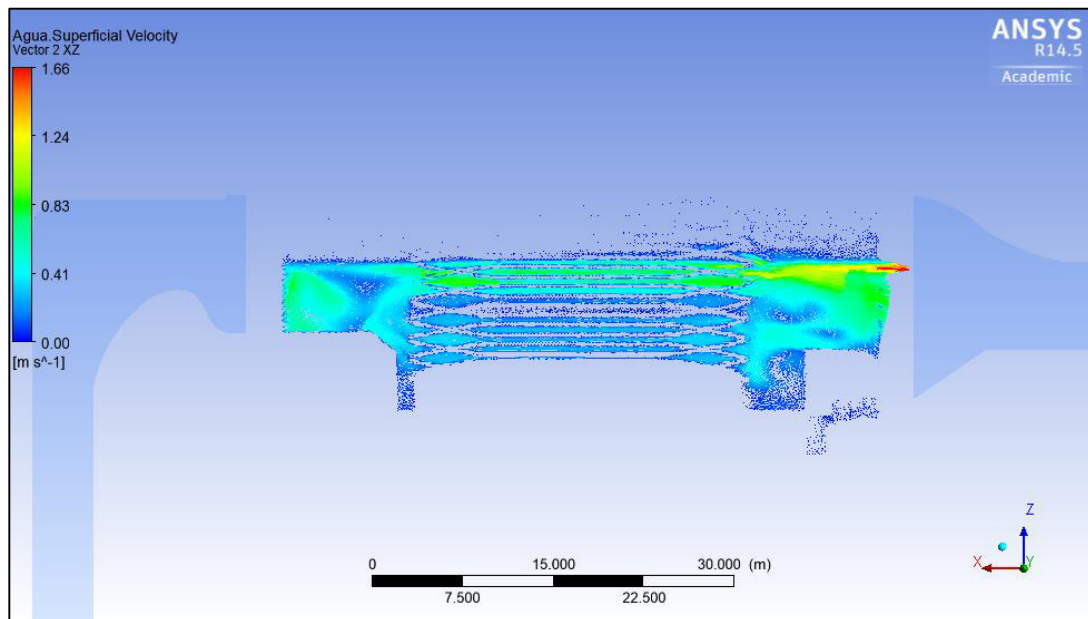


Figura 7.14: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

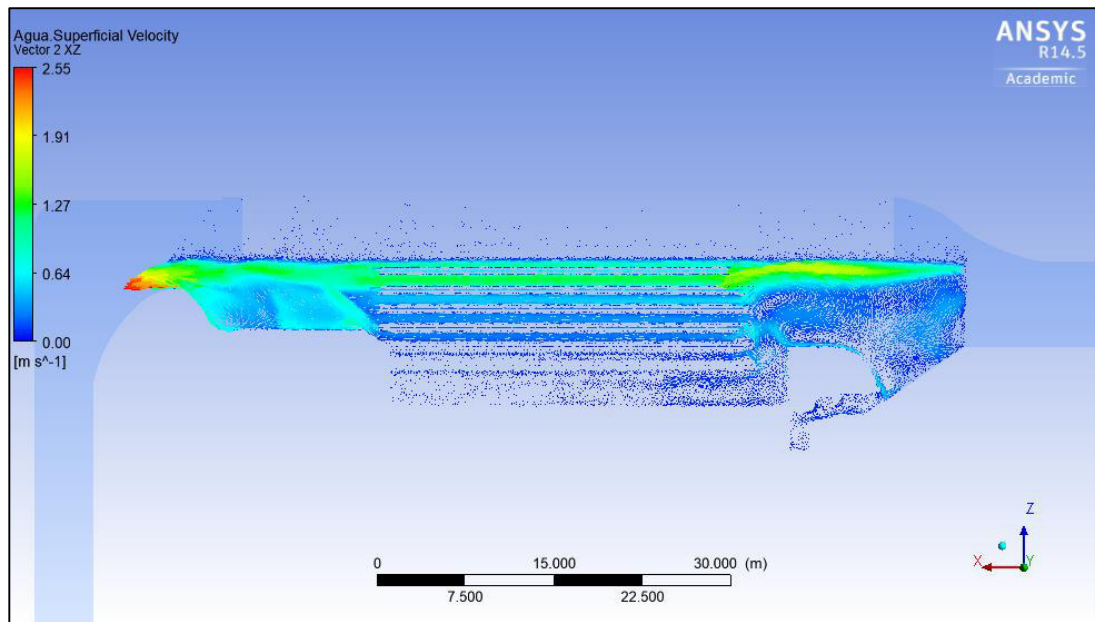
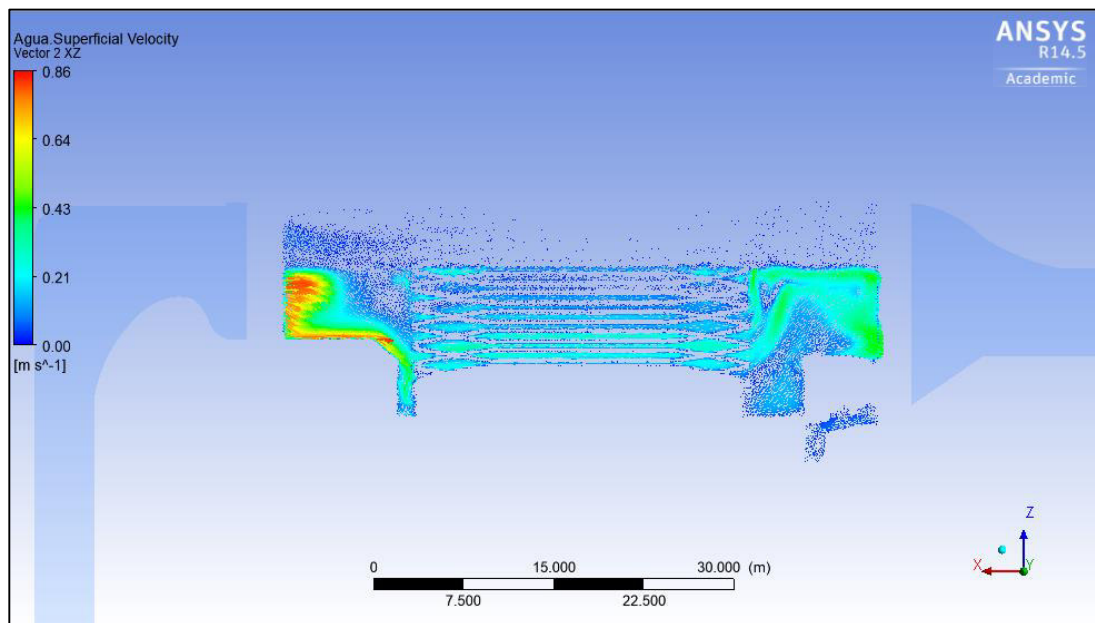


Figura 7.15: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal



- **Sección transversal**

En las figuras se describen los vectores de velocidad en la sección transversal de las naves centrales y laterales del desarenador con tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

Los vectores de velocidad en la sección transversal en la entrada de la nave central del desarenador con tabiquería presentan vórtices de diferentes magnitudes que tienden ir hacia la parte derecha de la sección transversal, hacia el plano de simetría, donde se observan que los mayores valores de velocidad en la sección.

Por otro lado los vectores de velocidad en la entrada de la nave lateral del desarenador con tabiquería, un parte de los vectores tienden a converger hacia el centro y otros hacia las paredes de la nave, esto hace indicar la posible formación de turbulencia en la salida de la nave central.

Figura 7.16: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 48$ m³/s – Sección transversal

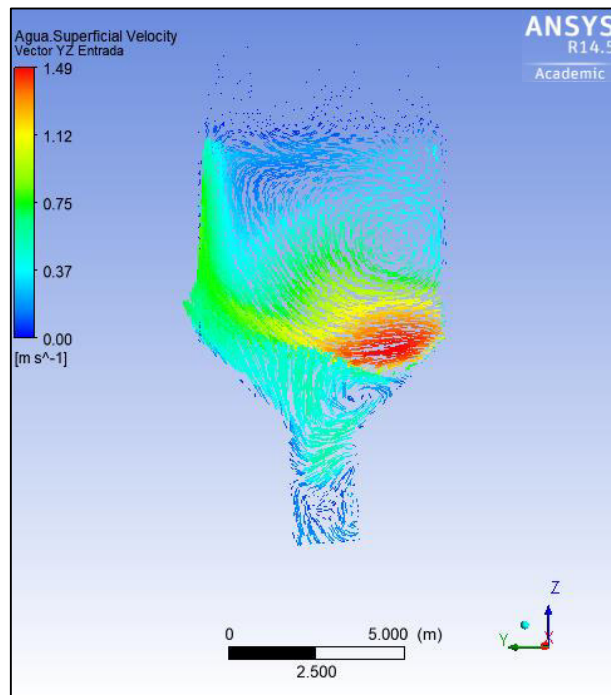


Figura 7.17: Vectores de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48$ m^3/s – Sección transversal

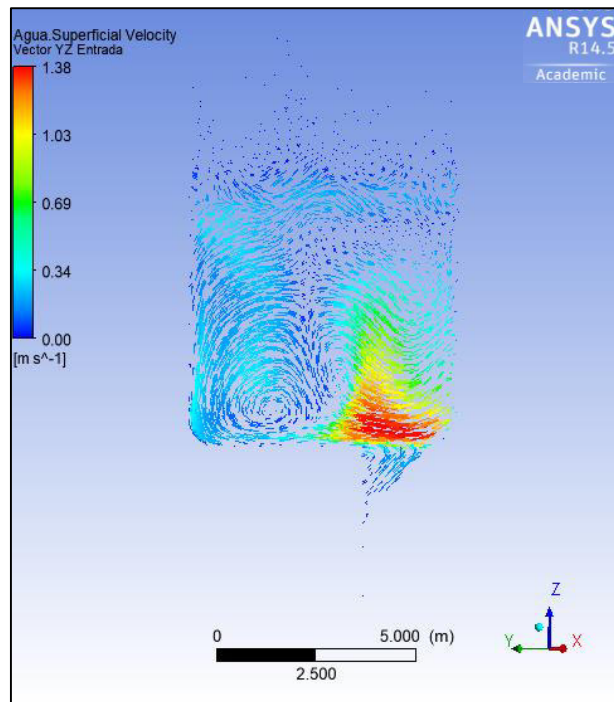


Figura 7.18: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

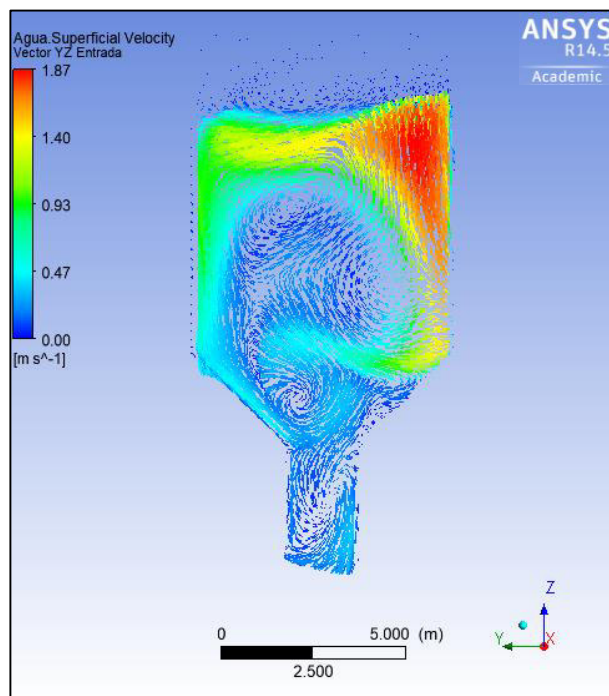


Figura 7.19: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

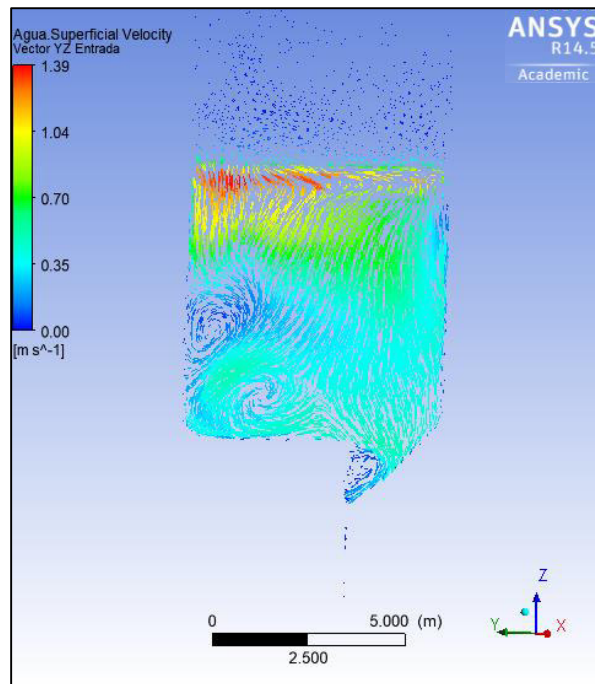


Figura 7.20: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80$ m^3/s – Sección transversal

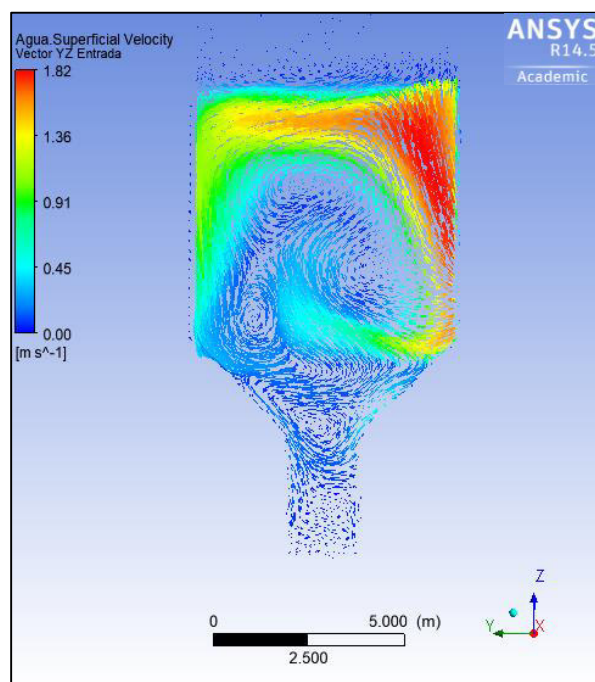
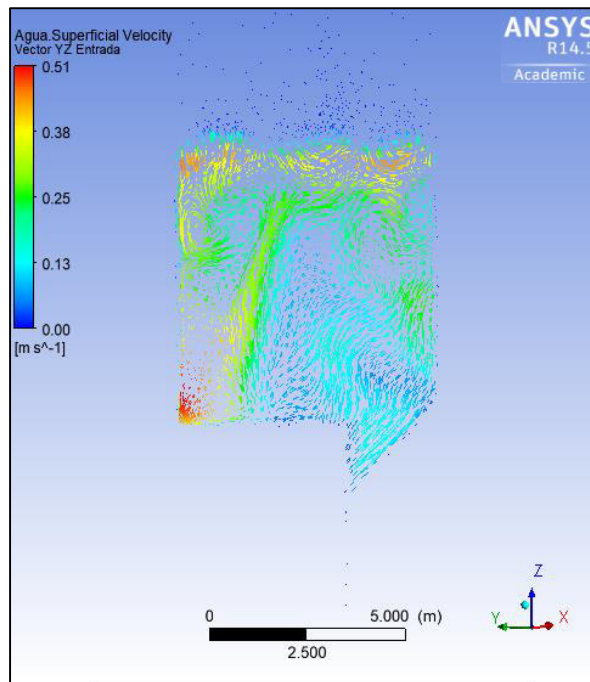


Figura 7.21: Vectores de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal



Contornos de velocidades

Como parte de los resultados de la simulación hidrodinámica, los contornos de velocidad nos permiten determinar los rangos de velocidad en las zonas de interés dentro de la estructura del desarenador con tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

- **Vista en planta**

Las siguientes figuras muestran los contornos de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador con la tabiquería.

En el canal de acceso al desarenador se puede apreciar para todos los caudales simulados, la velocidad no desarrolla cambios bruscos de magnitud en todo el largo del canal, mientras que en la transición que une el canal de acceso y las naves del desarenador se presentan diferentes sectores de velocidad, y los de mayor magnitud tienden a desarrollarse hacia la nave central. En la confluencia de las salidas de las naves centrales y laterales la tendencia de la velocidad es aumentar hacia la cresta del vertedero.

En la tabiquería de la nave central, las mayores magnitudes de velocidad se presentan en los diedros que se encuentran próximos al plano de simetría del desarenador, debido a la tendencia unidireccional del flujo de agua que ingresa desde el canal de acceso al desarenador.

En la tabiquería de la nave lateral, se presentan variaciones mínimas de velocidad de flujo, esto es debido a que en entrada de la nave lateral se genera vorticidad, además que curvatura que presenta la nave genera resistencia al flujo de agua.

Figura 7.22: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

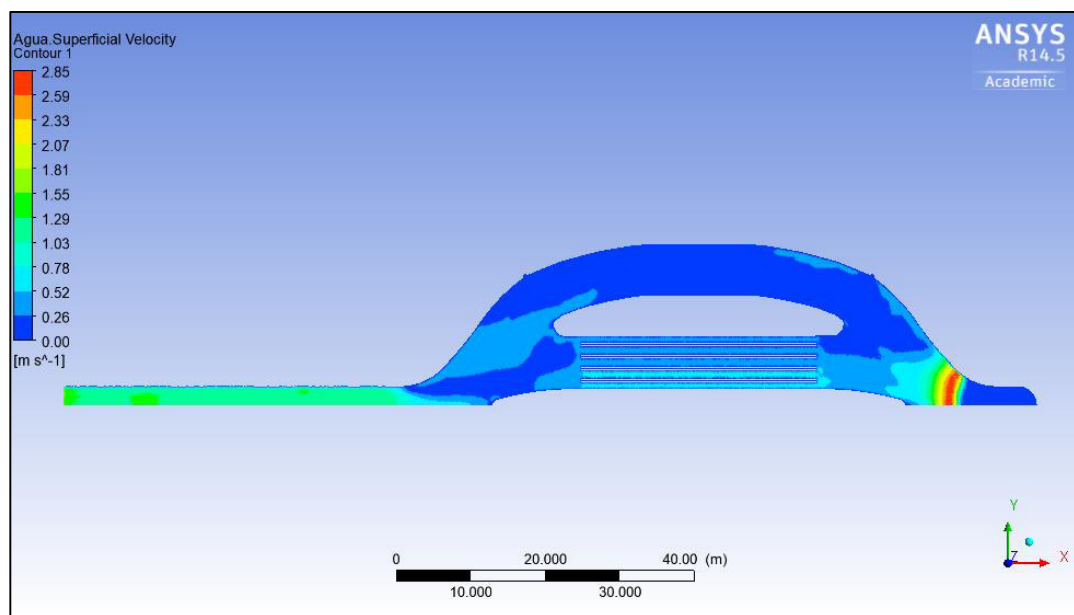


Figura 7.23: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

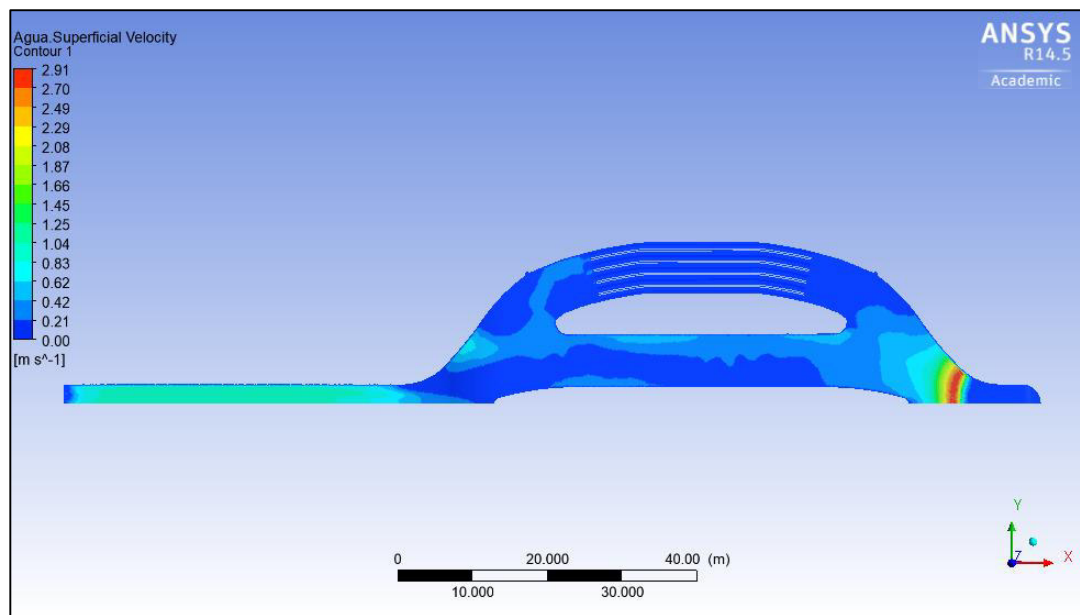


Figura 7.24: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

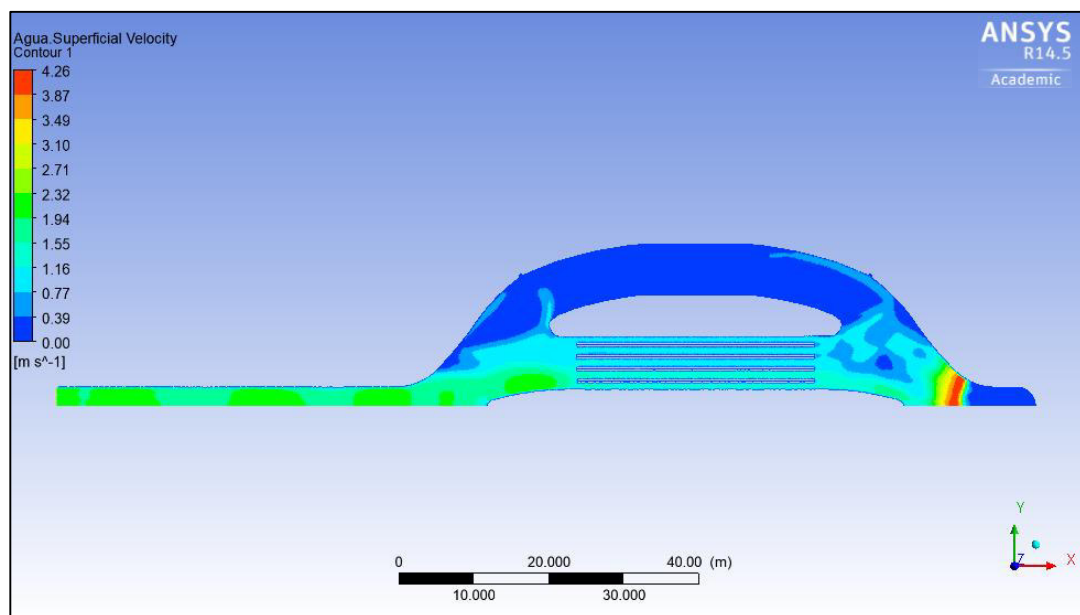


Figura 7.25: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72$ m^3/s – Vista en planta

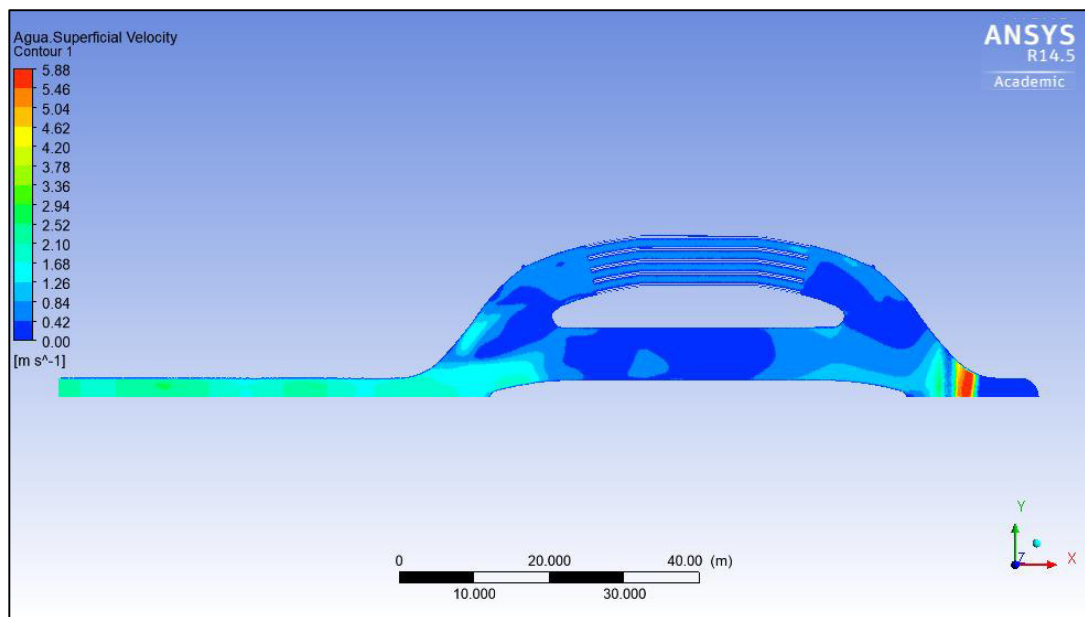


Figura 7.26: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80$ m^3/s – Vista en planta

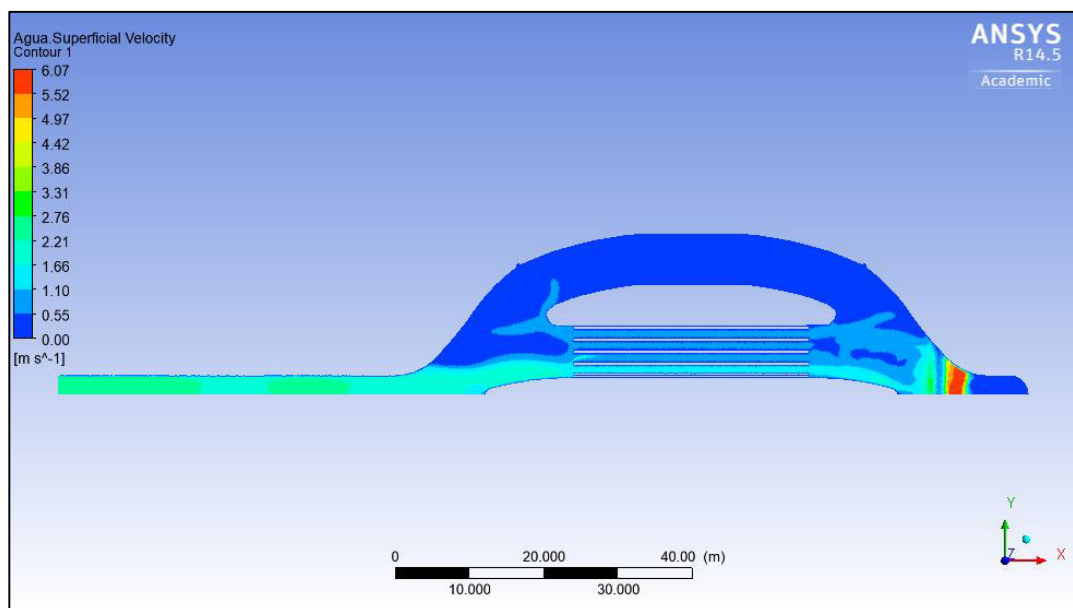
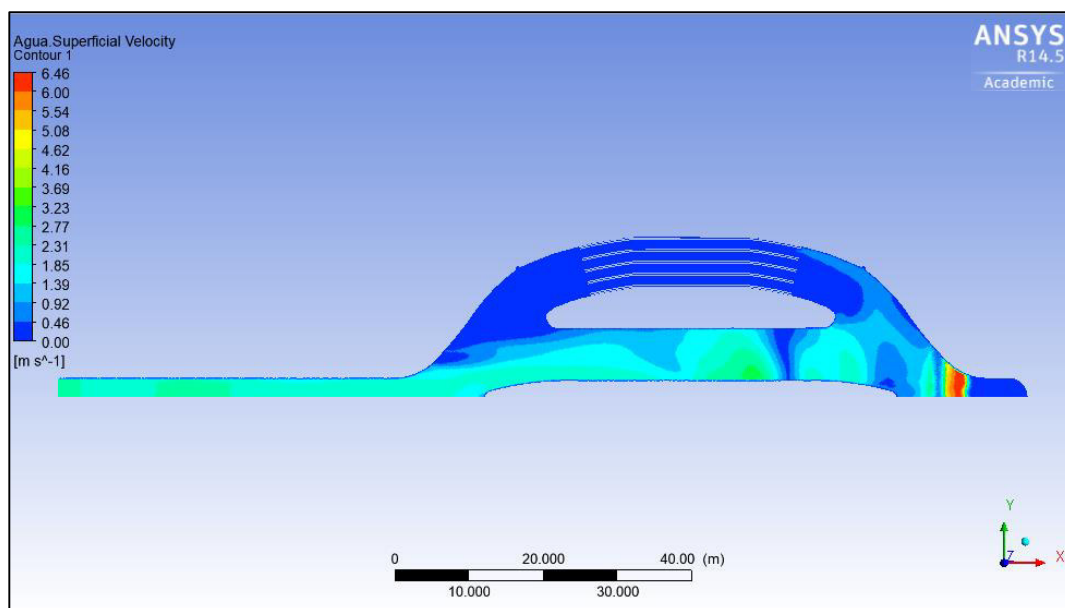


Figura 7.27: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta



- **Vista longitudinal**

Las siguientes figuras representan los contornos de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador con tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato desde una vista longitudinal para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Cabe recalcar que la dirección del flujo de agua en las figuras es de derecha a izquierda, eso quiere decir que el canal de entrada y la transición se encuentran en la parte derecha y la tubería vertical llamada “pique” se encuentra a la izquierda de la figura.

Como se pudo apreciar con los vectores de velocidad, en las naves centrales con tabiquería los diedros que se encuentran en la parte superior desarrollan mayor velocidad que los diedros de la parte inferior. Lo contrario sucede en las naves laterales donde en los diedros inferiores se desarrollan mayor velocidades.

Además, se puede apreciar que antes de ingresar y después de salir de las naves centrales y laterales con tabiquería, se presentan diferentes rangos de velocidad, por lo que se concluye que no hay una distribución uniforme del flujo debido a los efectos de turbulencia y vorticidad.

Figura 7.28: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

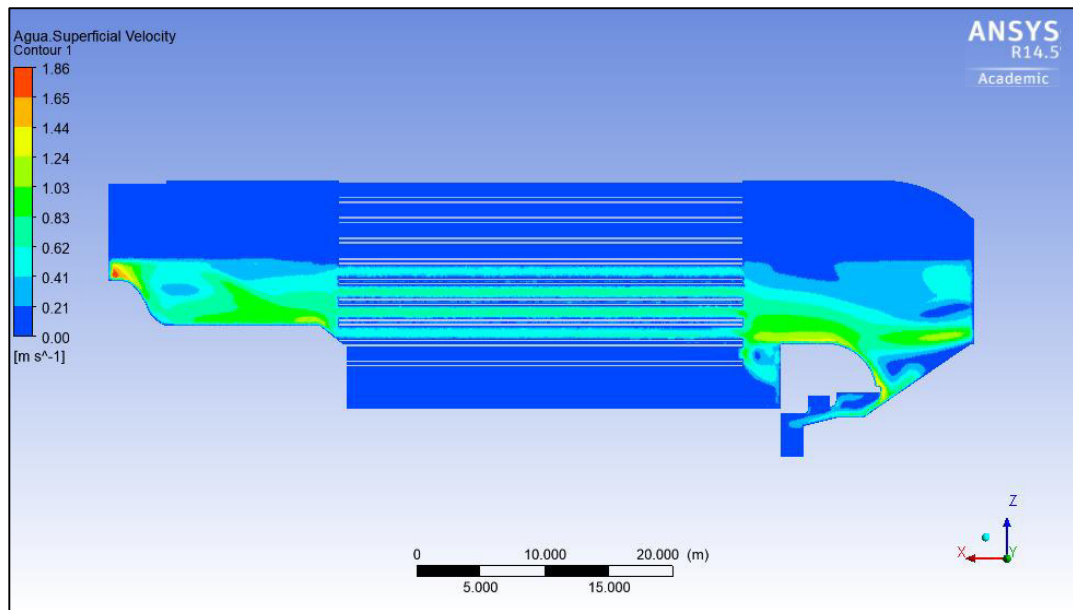


Figura 7.29: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

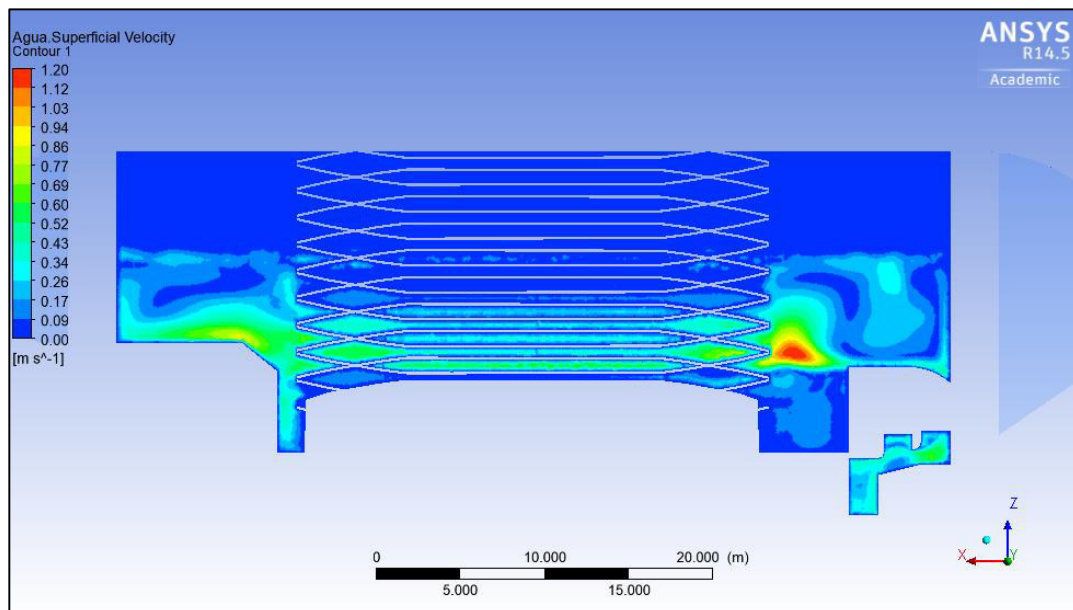


Figura 7.30: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

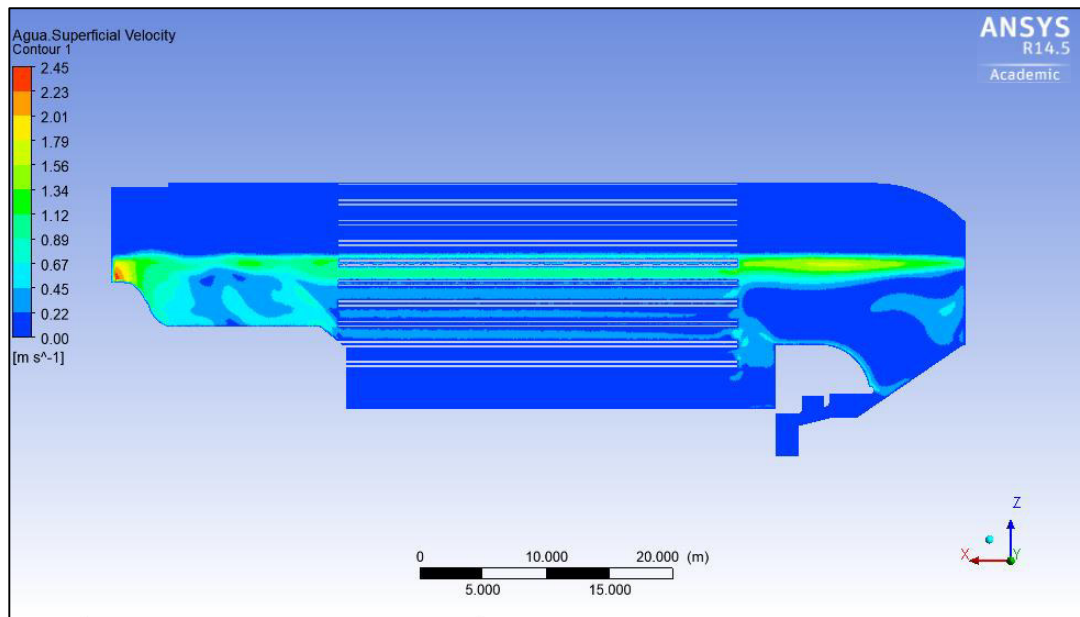


Figura 7.31: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

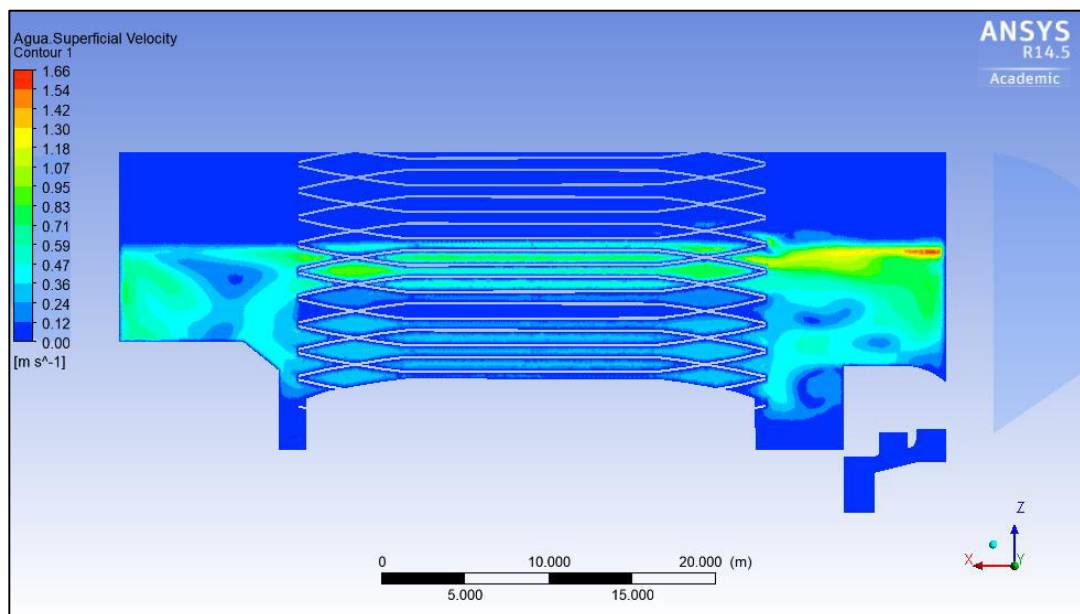


Figura 7.32: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

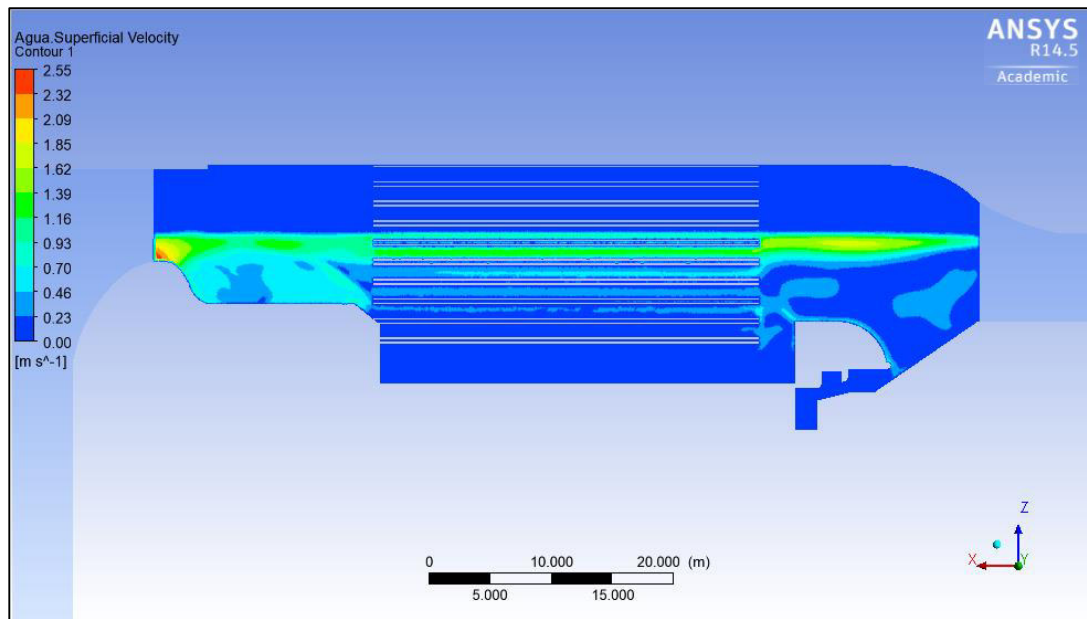
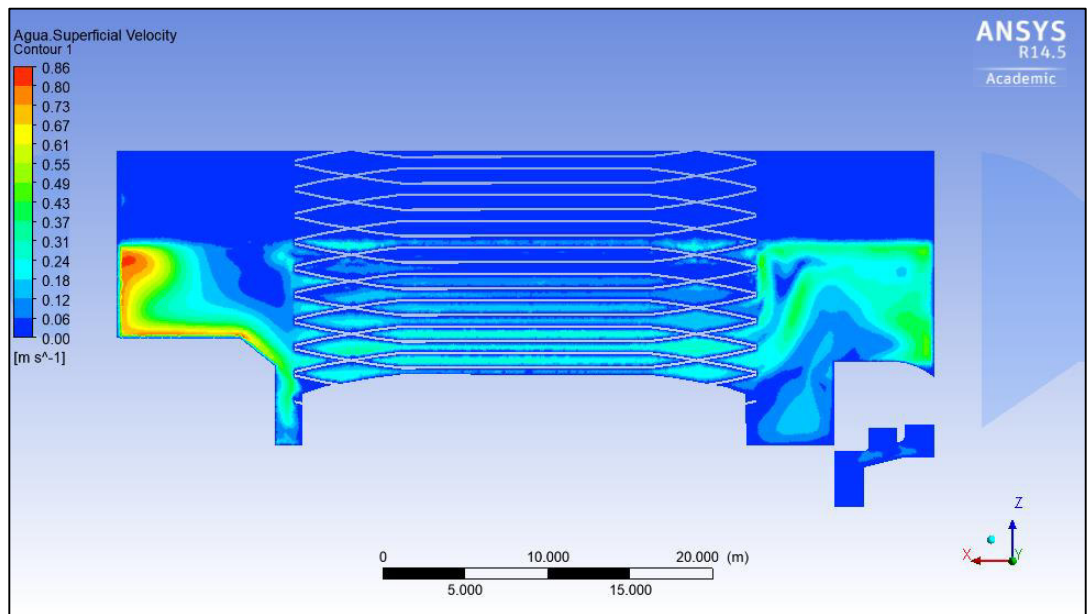


Figura 7.33: Contorno de velocidad del desarenador con tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal



- **Sección transversal**

Las figuras describen los contornos de velocidad en la sección transversal de las naves centrales y laterales del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

Como se puede apreciar en las figuras, las secciones transversales han cortado la tabiquería de las naves, donde se puede observar los diedros que conforman las tabiquerías de las naves centrales y laterales.

En la nave central, los contornos de velocidad que presentan mayores valores se encuentran en la parte superior derecha de la sección transversal, esto se debe a que el volumen de agua que ingresa por el canal de acceso tiende a seguir su curso por la transición hasta llegar a las naves del desarenador.

En la nave lateral, los contornos de velocidad para los caudales simulados se encuentran en diferentes direcciones de la sección transversal, esto se debe a que el flujo no se uniformiza al ingresar a la nave, debido a los vórtices que se presentan en la transición y la turbulencia dentro de la nave.

Figura 7.34: Contorno de velocidad del desareandor con la tabiquería en la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

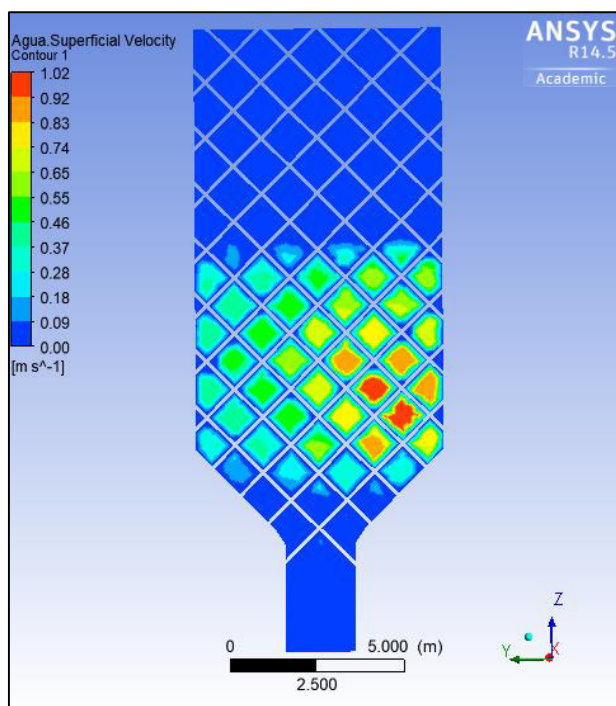


Figura 7.35: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

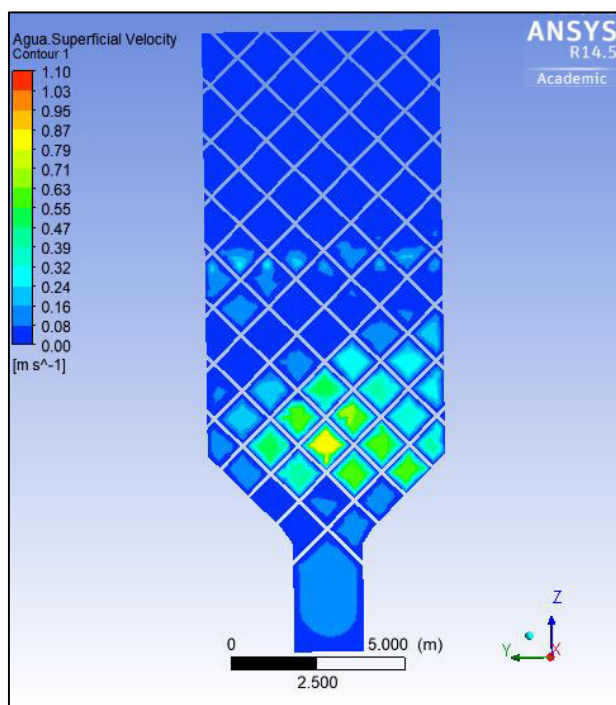


Figura 7.36: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

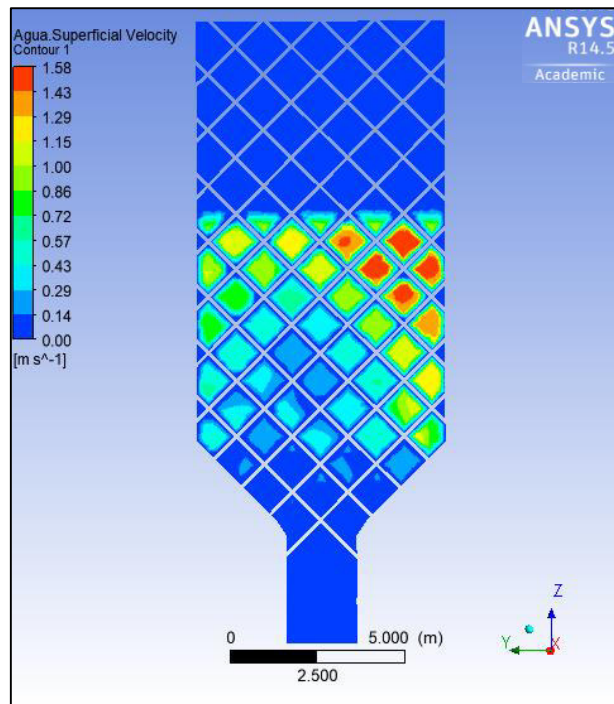


Figura 7.37: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

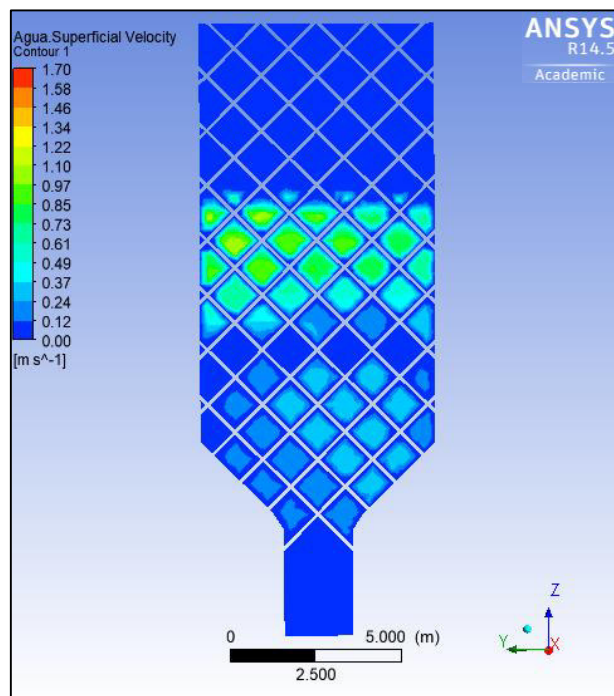


Figura 7.38: Contorno de velocidad del desarenador con la tabiquería en la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

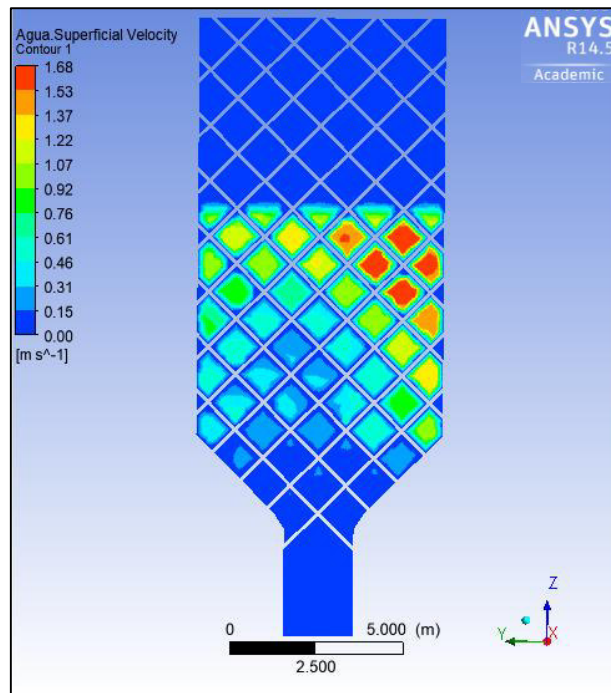
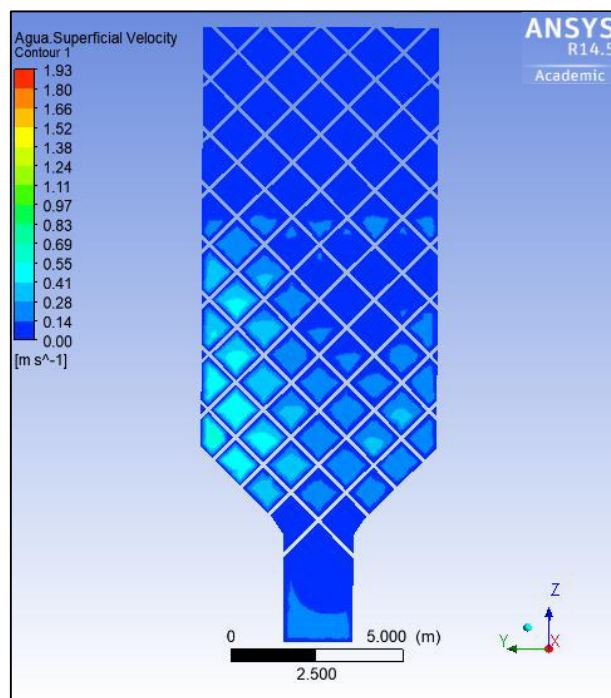


Figura 7.39: Contorno de velocidad de desarenador con la tabiquería en la nave lateral, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal



7.1.2. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería

Los resultados expuestos en este segmento se basan en la propuesta de mejora del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, en la cual se basa en realizar la simulación hidrodinámica sin las tabiquerías que presentan actualmente en las naves centrales y laterales del desarenador.

Para la validación de los resultados, nos basaremos en la discretización del Escenario 1 de la simulación hidrodinámica, donde el tamaño de elementos a trabajar es de 0.30 m que conforma la discretización del dominio. El detalle de la validación de los resultados se encuentra en el Capítulo 6 de este trabajo.

A continuación se muestra los resultados de la simulación hidrodinámica del Escenario 2, de la velocidad media en la entrada y salida de las naves centrales y laterales del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin las tabiquerías que existen actualmente.

Cuadro 7.2: Velocidad media en la sección transversal en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería para diferentes caudales de ingreso

Caudal de ingreso (m ³ /s)	Nave Central		Nave Lateral	
	Entrada (m/s)	Salida (m/s)	Entrada (m/s)	Salida (m/s)
48	0,2807	0,2081	0,1026	0,0891
72	0,3635	0,3346	0,1157	0,0666
80	0,4118	0,3706	0,1142	0,1022

En el Cuadro 7.2, se observa que las velocidades medias en la entrada y en la salida del desarenador son mayores en las naves centrales que en las naves laterales, esto se debe a la geometría del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, donde la transición que une el canal de acceso con las naves del desarenador tiene una longitud que no permite la buena distribución del flujo en todas las naves. En el Capítulo 4, donde se describen los Factores que causan la variación de la orientación del flujo en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, dice lo siguiente:

El ensanchamiento brusco entre la sección de la galería de aducción y la sección de ingreso tiene una transición de longitud muy pequeña que las une, de las cuales

provoca una mala distribución de las velocidades en las naves tabicadas del desarenador.

Además, comprando los cuadros 7.1 y 7.2, las velocidades en la nave central son ligeramente mayores en el desarenador sin tabiquería (Escenario 2) que el desarenador con tabiquería en las naves (Escenario 1), esto se debe al incremento de la sección de entrada de la nave central, debido a que la tabiquería ocupa en cada nave 11.46 m^2 , eso quiere decir que la masa de agua que ingresa por el canal de acceso al desarenador genera un flujo uniforme que se desarrolla en el eje longitudinal, que es el mismo eje que comparte las naves centrales, por lo que la mayoría de flujo de agua ingresa por estas naves. Esto provoca también que en las naves laterales del desarenador sin tabiquería, las velocidades tanto en la entrada como en la salida sean muy parecidas conforme se van aumentando el caudal de ingreso al desarenador.

En las siguientes figuras se presentan los resultados de la simulación hidrodinámica del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería que existe actualmente, donde se presentan los resultados de fracción de volumen, perfiles de velocidad y contornos de velocidad, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Superficie libre

En las siguientes figuras se representa la fracción de volumen para definir la interfaz agua – aire para los tres caudales mencionados anteriormente. A partir de ello se identifica la superficie libre dentro de la estructura del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería en las naves, en la parte izquierda de la figura se muestra el rango de valores de la fracción de volumen de agua.

Figura 7.40: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$

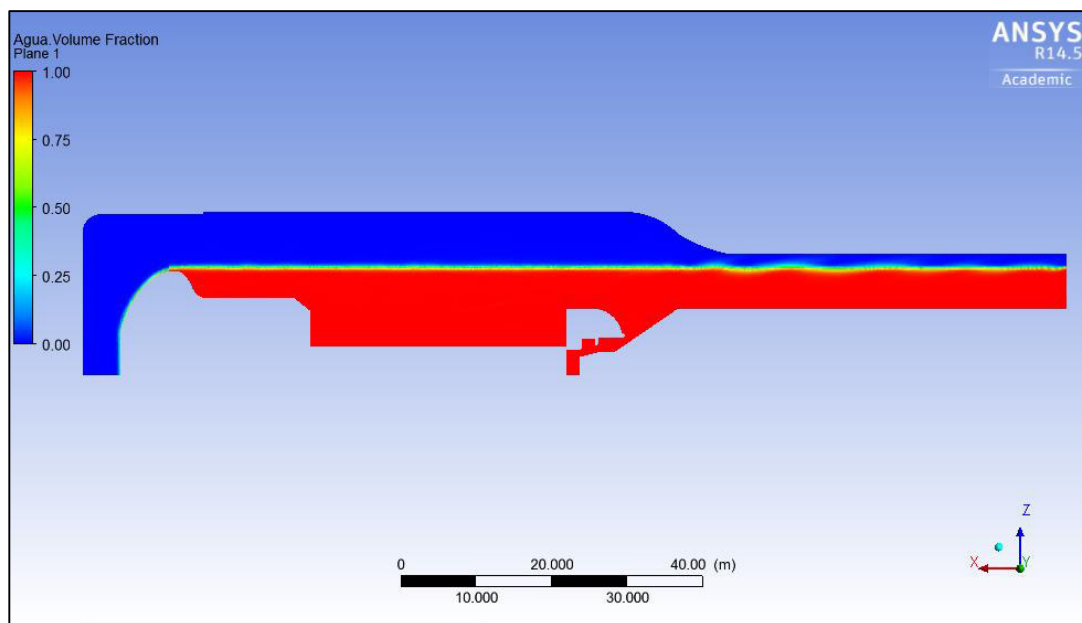


Figura 7.41: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$

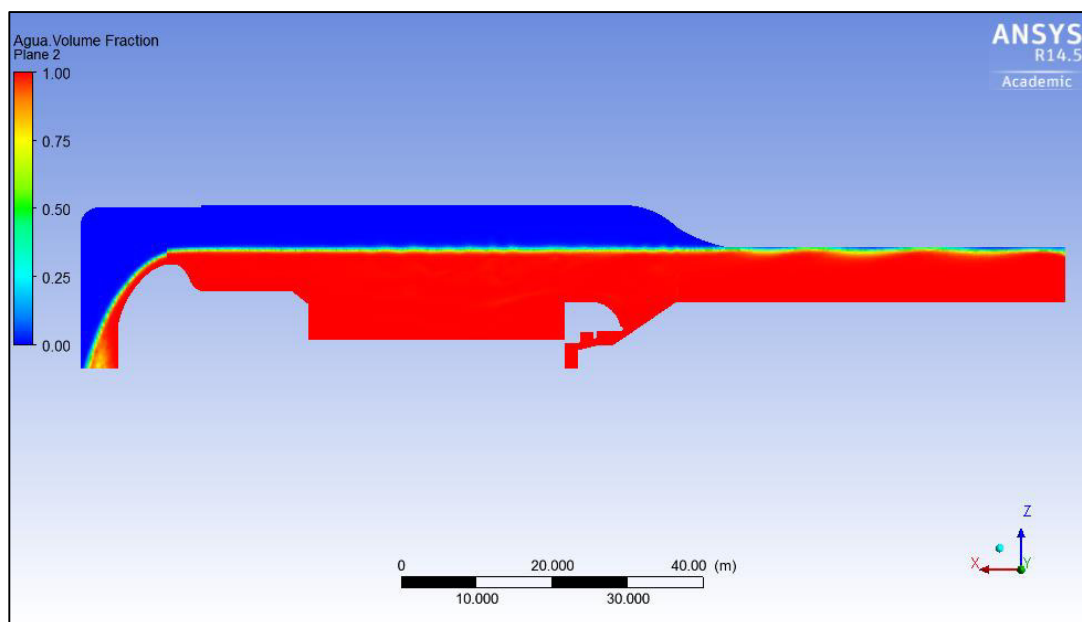
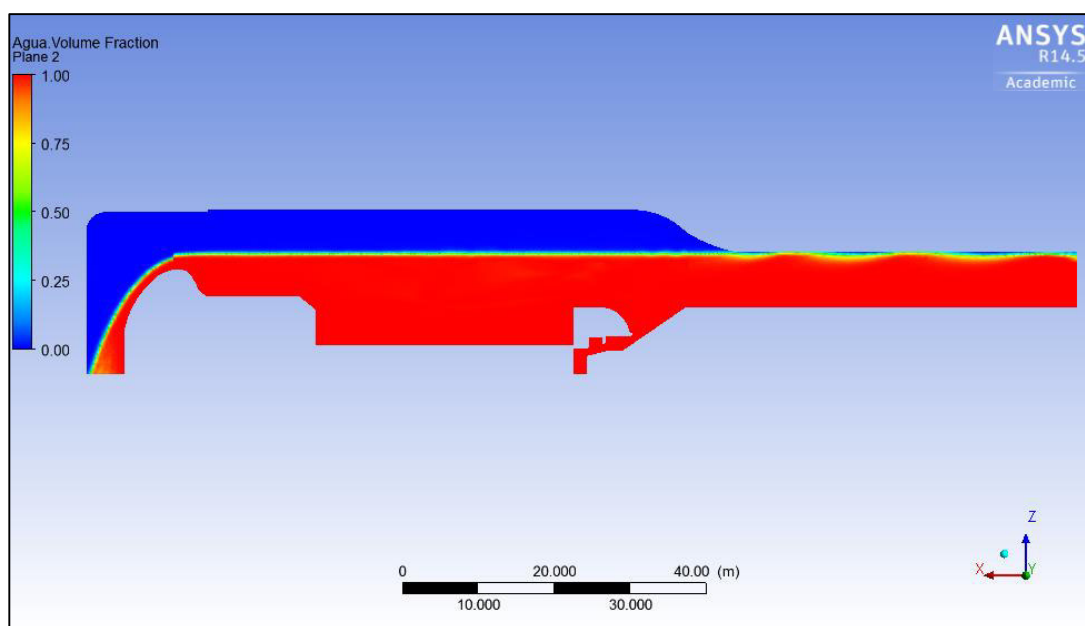


Figura 7.42: Superficie libre del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$



Vectores de velocidad

Se presenta los resultados de los vectores de velocidad en el desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin tabiquería, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$, en diferentes proyecciones para poder interpretar los resultados obtenidos.

- **Vista en planta**

Las siguientes figuras muestran los vectores de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador sin la tabiquería. Donde se observa que las líneas de corriente se distribuyen de forma uniforme a lo largo del canal de acceso al desarenador y no se forman flujos preferenciales o vórtices.

Como se había comentado anteriormente, la geometría del desarenador impide uniformizar el flujo de agua que ingresa a las naves centrales y laterales, debido a que las naves centrales se encuentran en la misma dirección del canal de acceso al desarenador, por lo que las masas de agua tienden a fluir hacia las naves centrales, provocando la mayor velocidad de flujo en las naves centrales que en las laterales. Además, se presenta vórtices en la entrada de las naves laterales, debido a la pequeña longitud de la transición. Los mayores valores de velocidad se encuentran en la cresta del vertedero, ubicada en la confluencia de las salidas de las naves centrales y laterales.

Figura 7.43: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

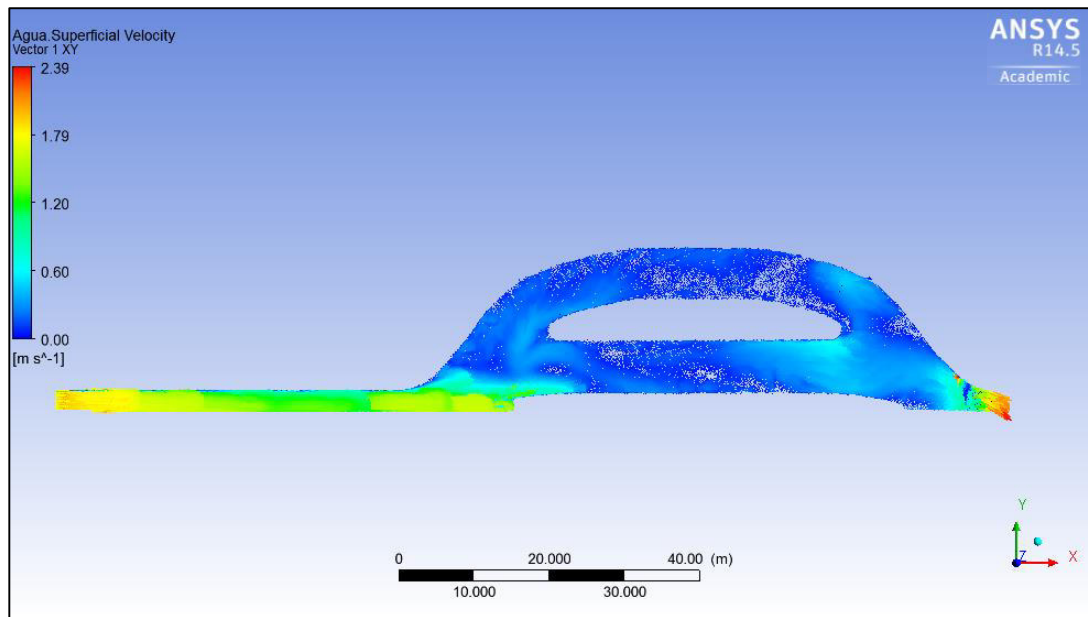


Figura 7.44: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

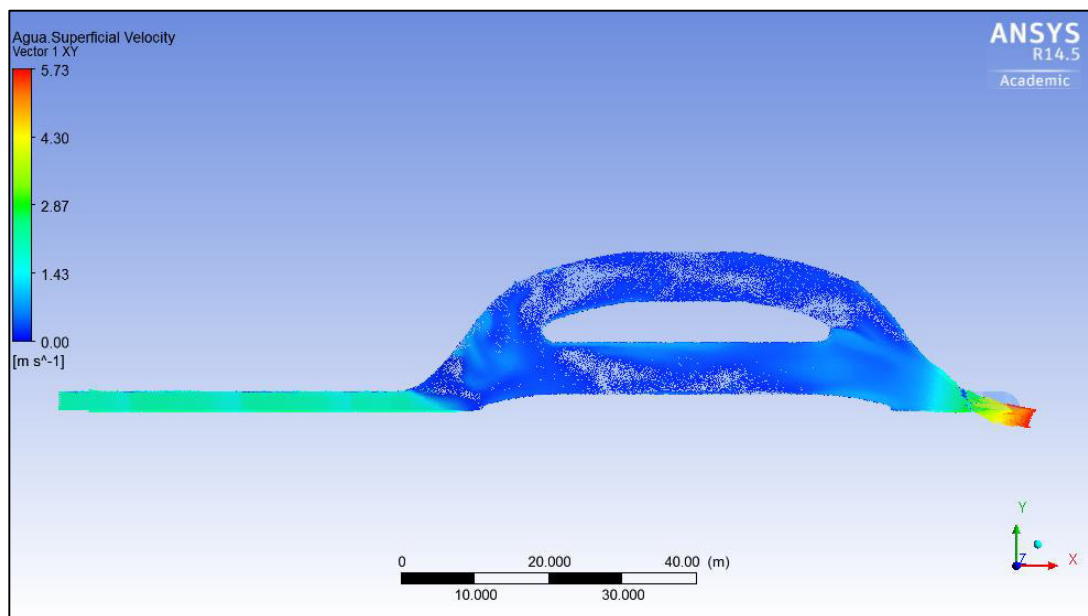
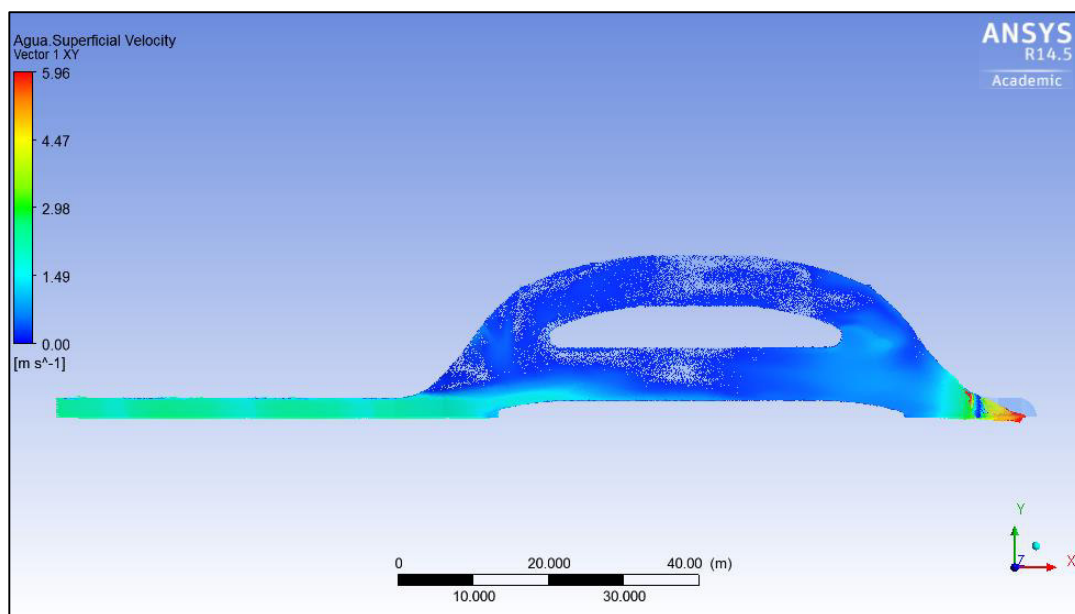


Figura 7.45: Vectores de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta



- **Vista longitudinal**

Las siguientes figuras representan los vectores de velocidad, desde una vista longitudinal de las naves centrales y laterales del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$. En cada una de las figuras se puede apreciar en la parte derecha el canal de acceso al desarenador y la transición, mientras que la parte izquierda se observa la tubería de presión vertical, denominada “pique”, por lo que la dirección del flujo de agua va desde la derecha hacia la izquierda.

En la nave central, se observa que los vectores de velocidad que ingresa a la nave se direccionan hacia el fondo de ella, para luego direccionarse hacia la salida de la misma.

En la nave lateral, se observa que los vectores de velocidad no se distribuyen uniformemente en la nave, debido a la turbulencia que se genera dentro de la nave, además de la curvatura que presenta la nave, por lo que genera resistencia al flujo de agua.

Figura 7.46: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48$ m^3/s – Vista longitudinal

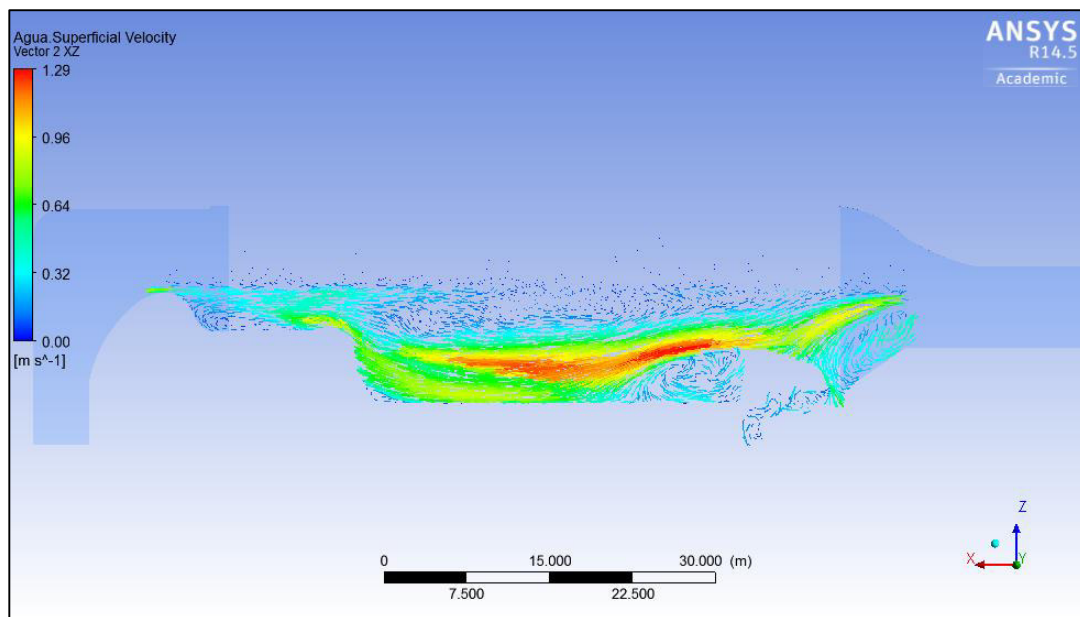


Figura 7.47: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Vista longitudinal

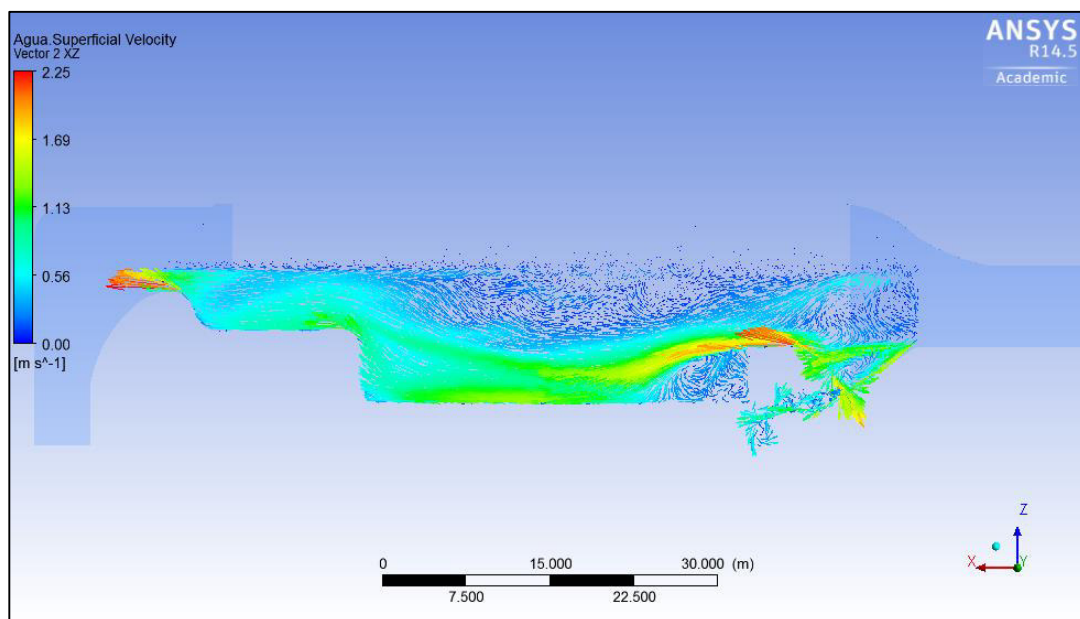


Figura 7.48: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador, sin tabiquería, para $Q = 80$ m^3/s – Vista longitudinal

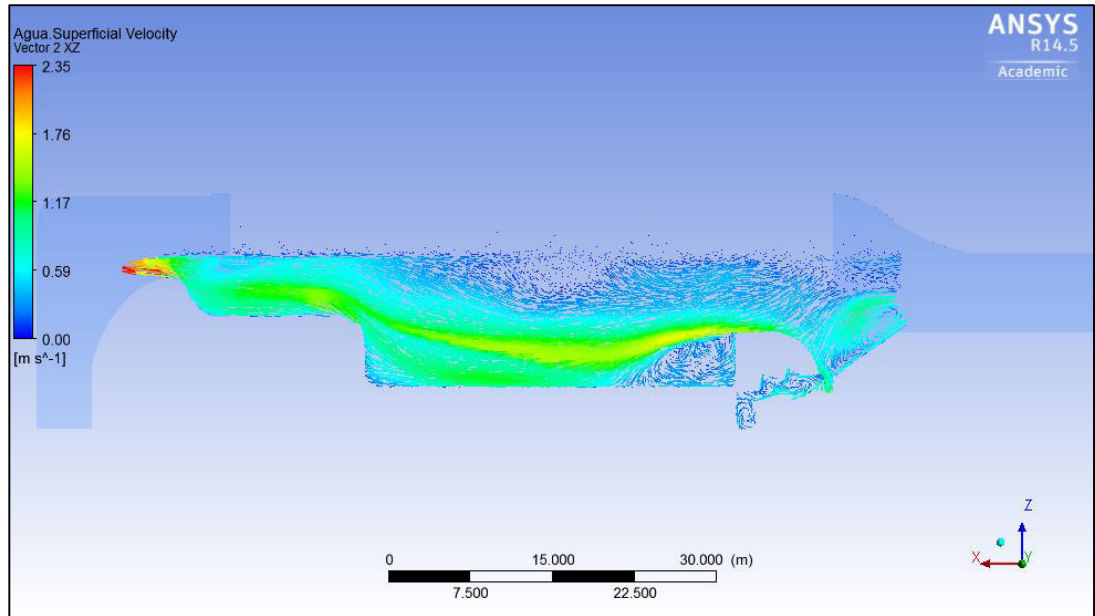


Figura 7.49: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48$ m^3/s – Vista longitudinal

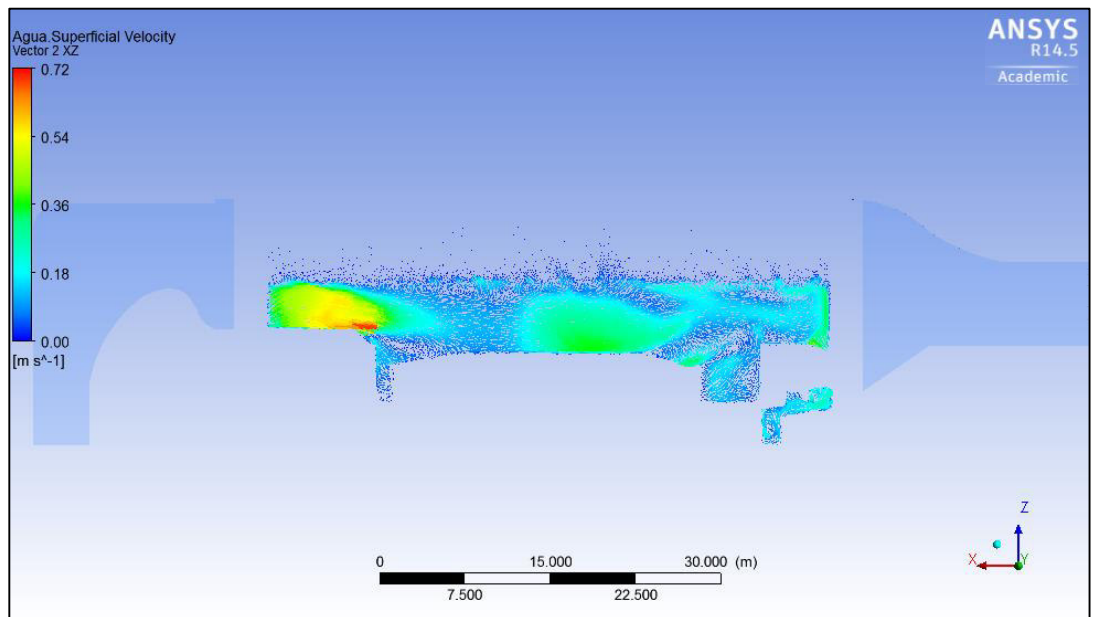


Figura 7.50: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Vista longitudinal

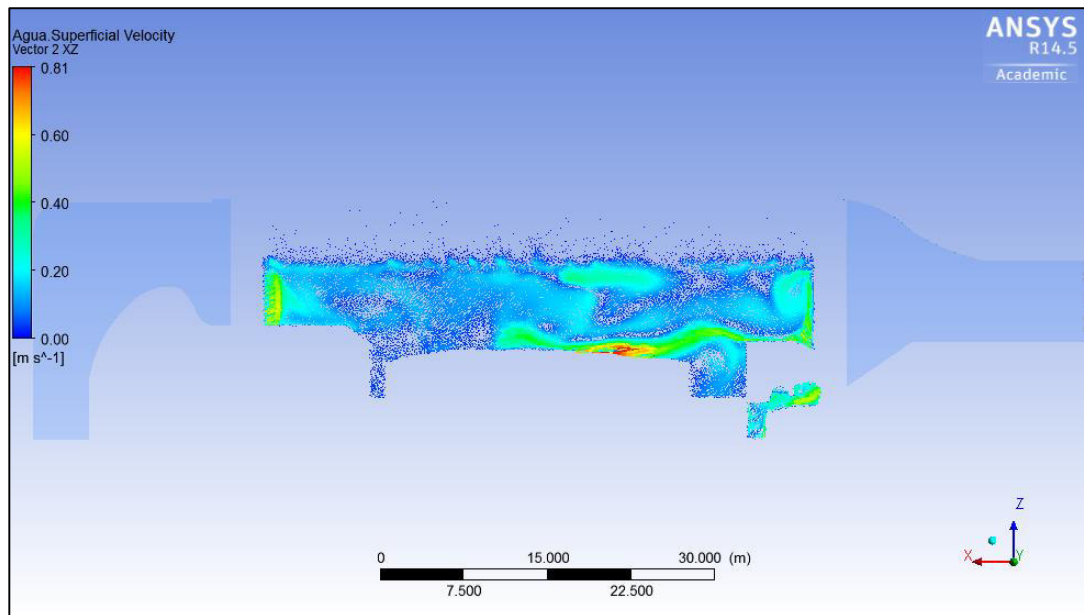
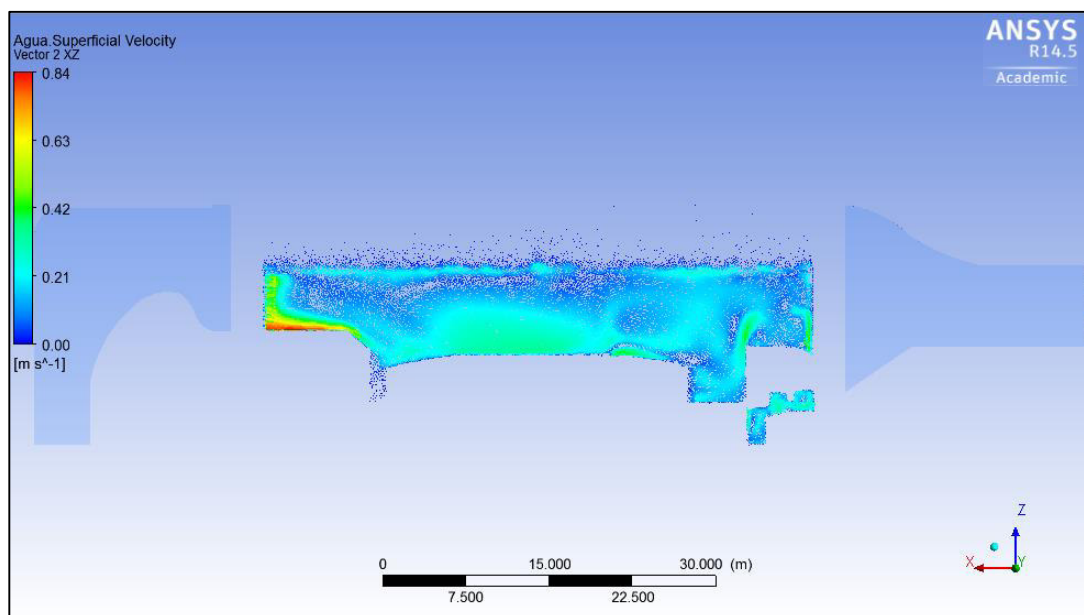


Figura 7.51: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80$ m^3/s – Vista longitudinal



- **Sección transversal**

En las figuras se muestran los vectores de velocidad en la sección transversal de las naves centrales y laterales del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s.

En la nave central, los vectores de velocidad en la sección transversal tienden ir hacia las paredes de la nave central, en específico hacia el plano de simetría, por lo que se encuentra los mayores valores de velocidad en dicha sección, esto es provocado por el canal de acceso al desarenador, que direcciona el flujo de agua en el eje longitudinal que también comparte las naves centrales del desarenador.

En la nave lateral, los vectores de velocidad en la sección transversal, una parte de ellos tienden ir hacia el centro de la nave, mientras que otros tienen tendencia hacia las paredes de la nave.

Figura 7.52: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para Q = 48 m³/s – Sección transversal

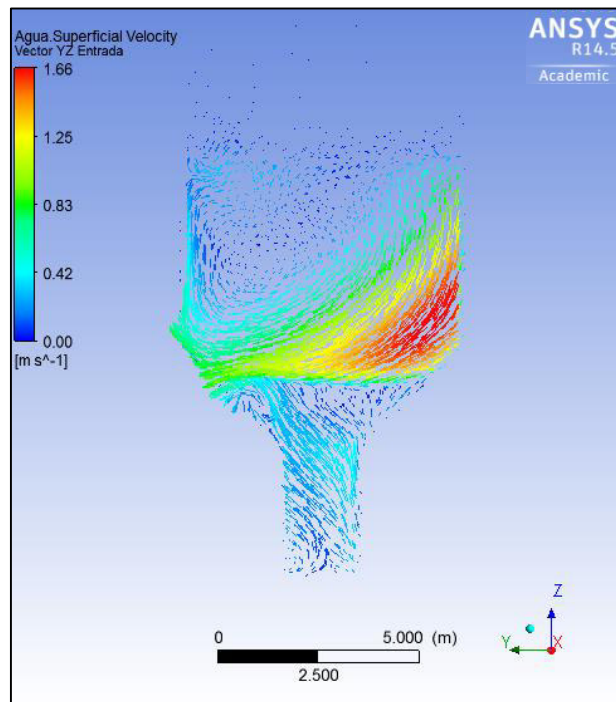


Figura 7.53: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48$ m^3/s – Sección transversal

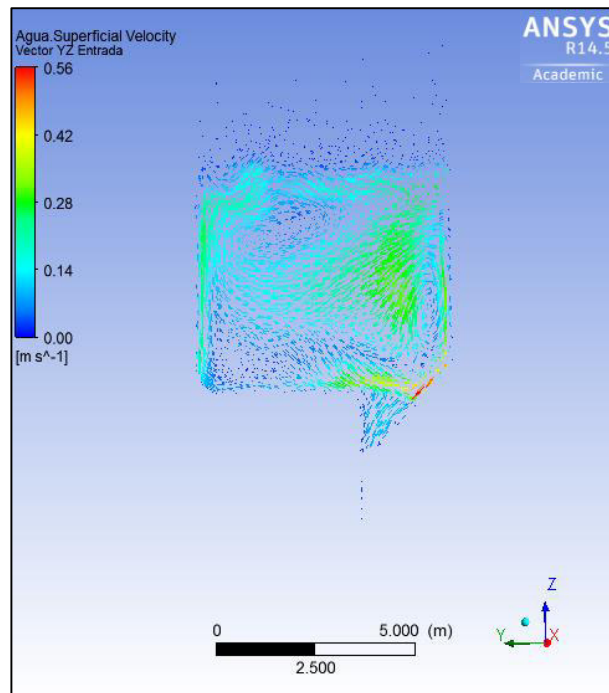


Figura 7.54: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

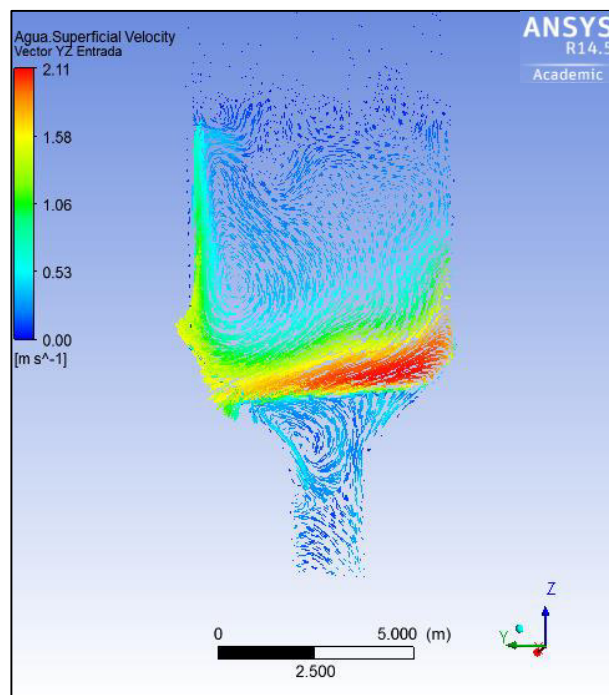


Figura 7.55: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

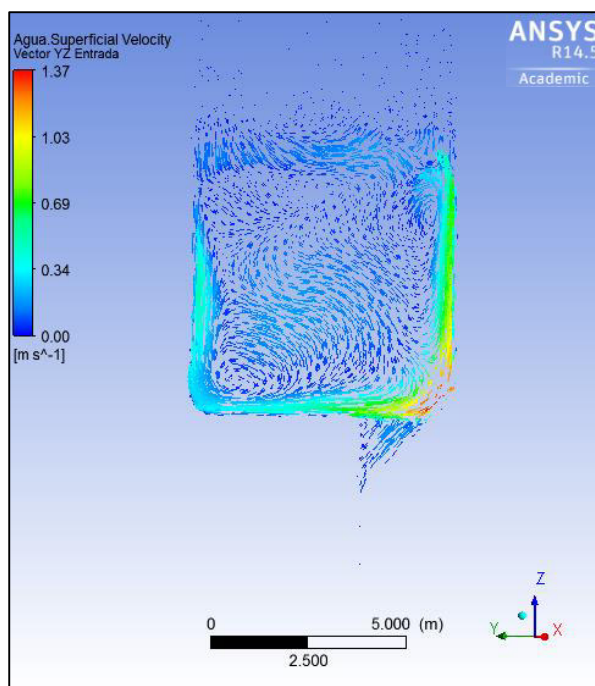


Figura 7.56: Vectores de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80$ m^3/s – Sección transversal

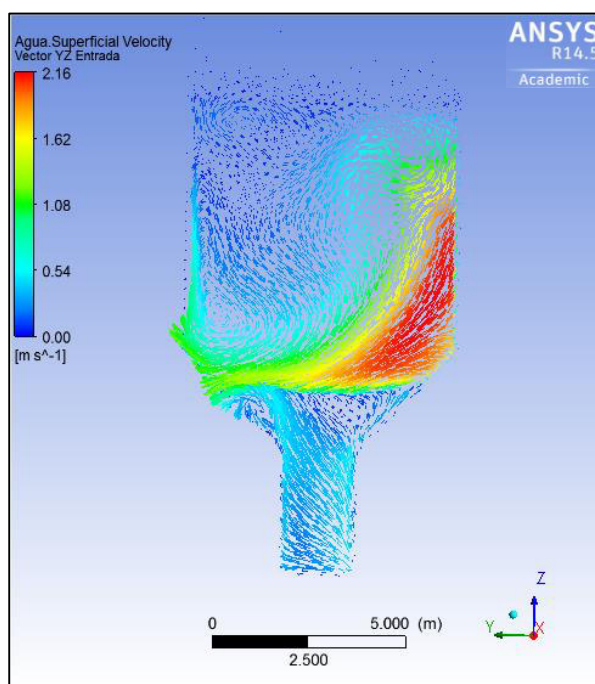
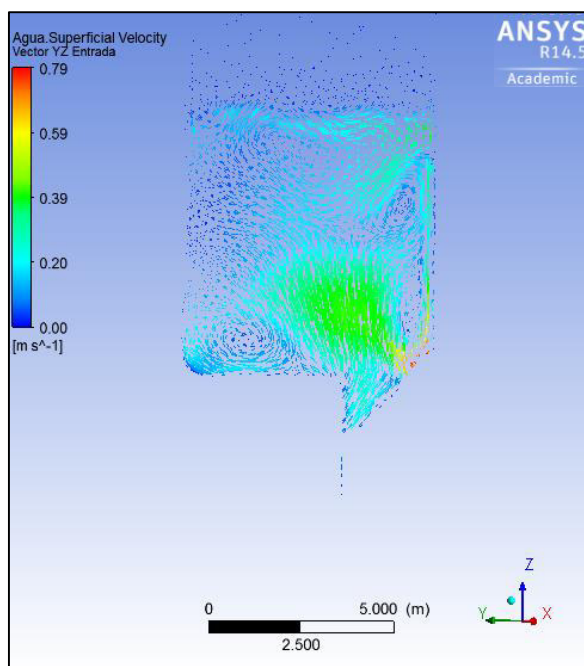


Figura 7.57: Vectores de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal



Contorno de velocidades

Los contornos de velocidad nos permiten identificar los rangos de velocidad en las zonas de interés de la estructura del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$. A continuación se muestra los resultados de la simulación hidrodinámica.

- **Vista en planta**

Las siguientes figuras muestran los contornos de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador sin la tabiquería.

Como se apreció en los contornos de velocidad del Escenario 1, el canal de acceso al desarenador presenta mínimas variaciones de velocidad, mientras que en la transición que une el canal de acceso con las naves desarenadoras, se presentan notorias variaciones de velocidad, además la mayor magnitud tiende a desarrollarse hacia la nave central. También, se puede apreciar que en la confluencia de las salidas de las naves centrales y laterales la tendencia de la velocidad es aumentar hacia la cresta del vertedero, cabe recalcar que la mayor magnitud de velocidad lo ofrece la nave central a la salida de esta.

Figura 7.58: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

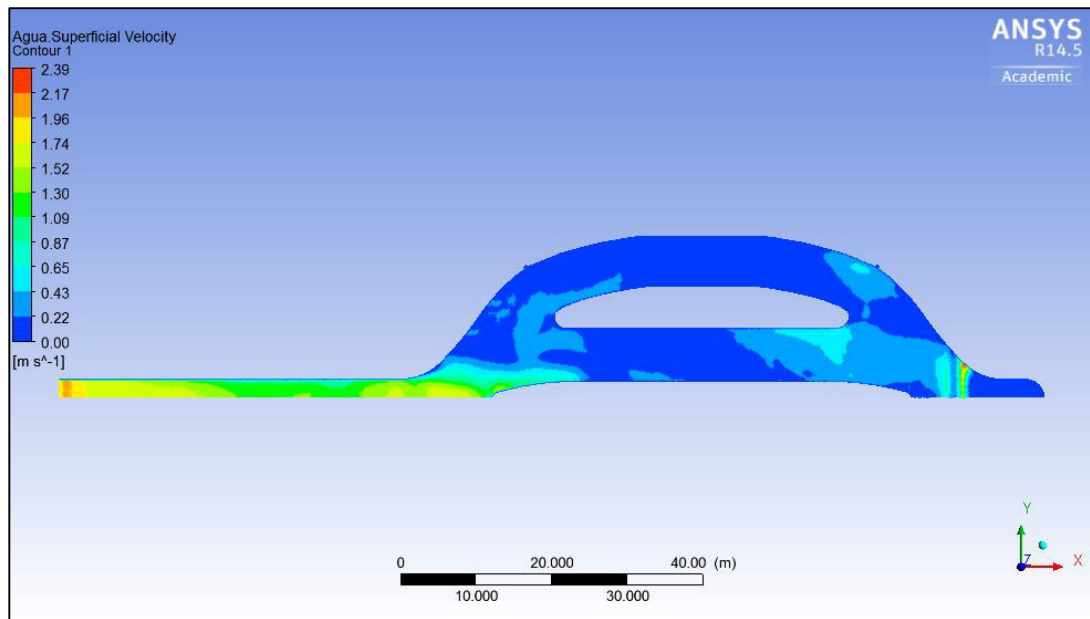


Figura 7.59: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

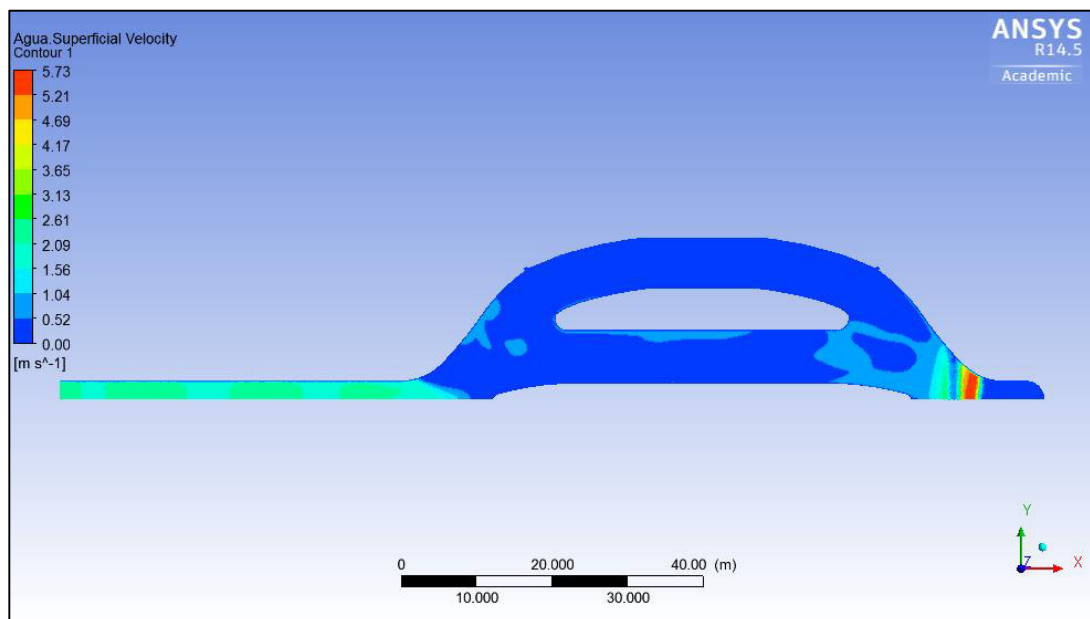
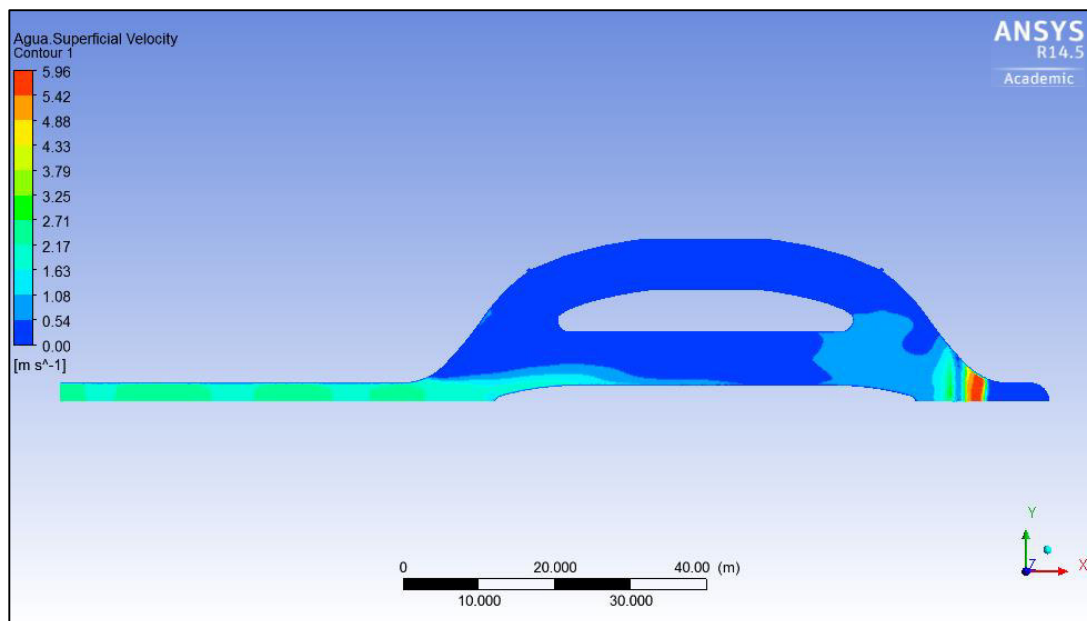


Figura 7.60: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta



- **Vista longitudinal**

Las figuras que se presentan a continuación, muestran los contornos de velocidad en las naves centrales y laterales del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato desde una vista longitudinal para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Cabe recalcar que la dirección de flujo del agua en las figuras es de derecha a izquierda, eso quiere decir que el canal de entrada y la transición se encuentra en la parte derecha y la tubería vertical, denomina “pique”, se encuentra a la izquierda de la figura.

En las naves centrales, se observan que los contornos de mayor velocidad se encuentran en el fondo de las naves y luego hacen su ascenso para salir fuera de ella. Mientras, que las naves laterales los sectores de velocidad presentan diferentes variaciones con una magnitud menor que en las naves centrales.

Además, se puede observar que en el ingreso y salida del flujo de la nave lateral del desarenador sin tabiquería, se presentan diferentes rangos de velocidad, por lo que se estima que no hay una distribución uniforme del flujo debido a los efectos de turbulencia y vorticidad.

Figura 7.61: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

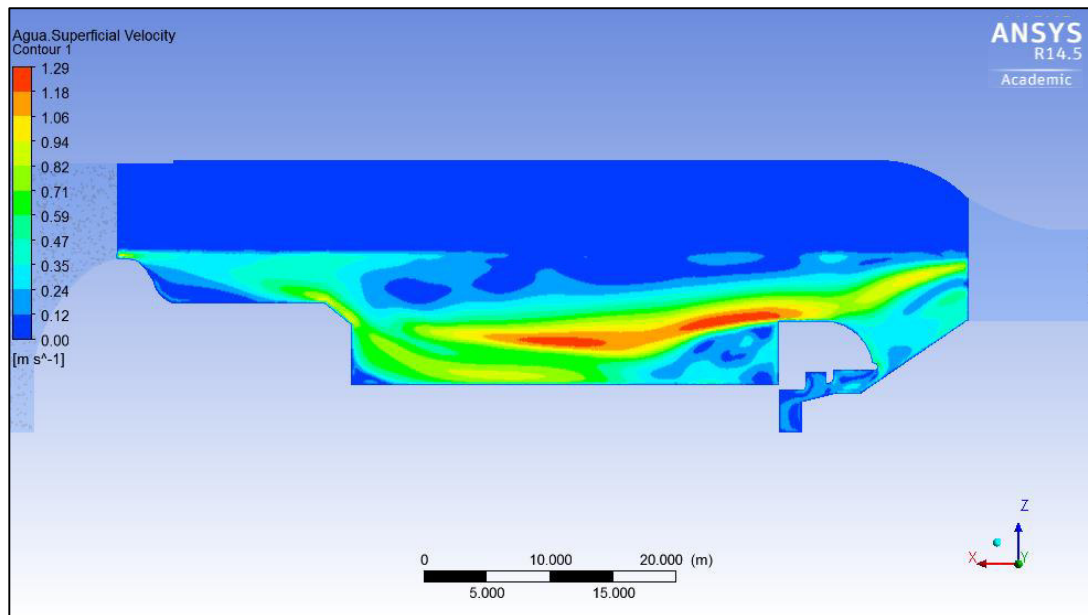


Figura 7.62: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

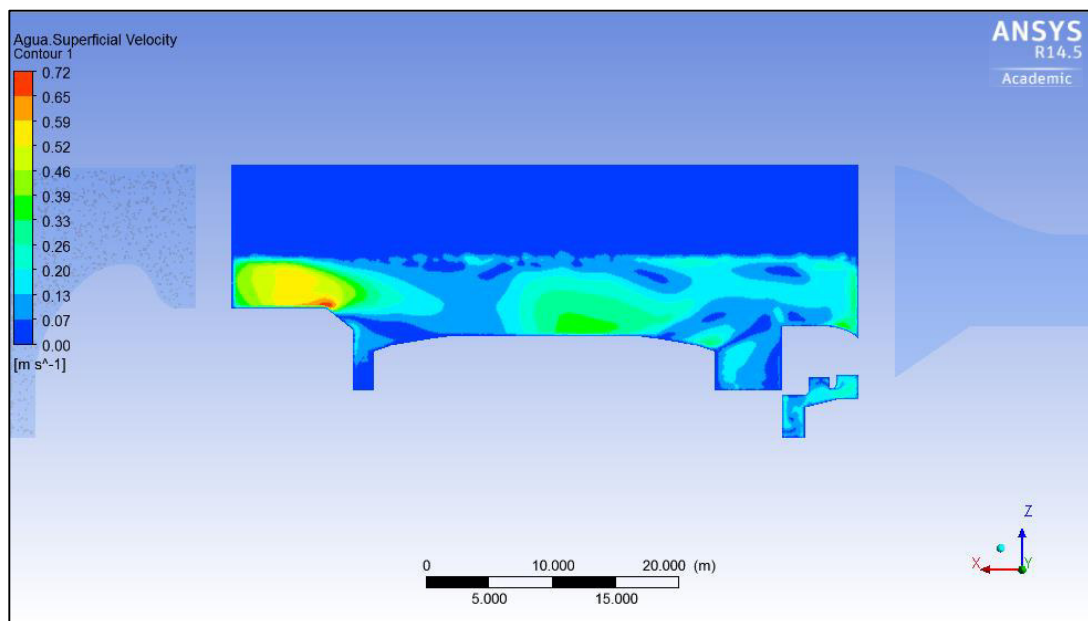


Figura 7.63: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

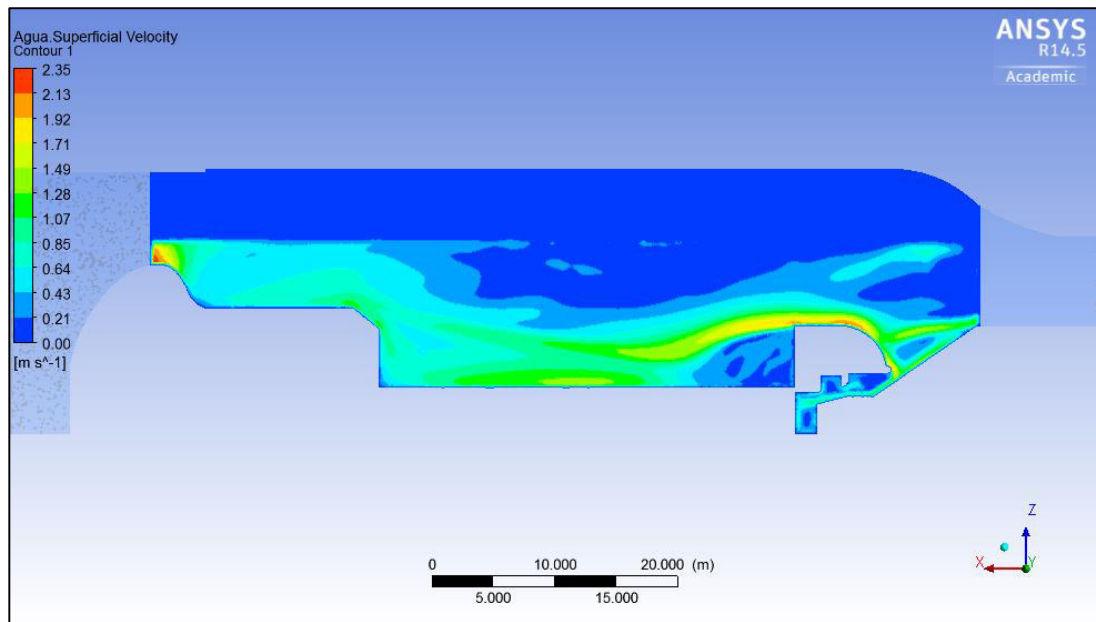


Figura 7.64: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

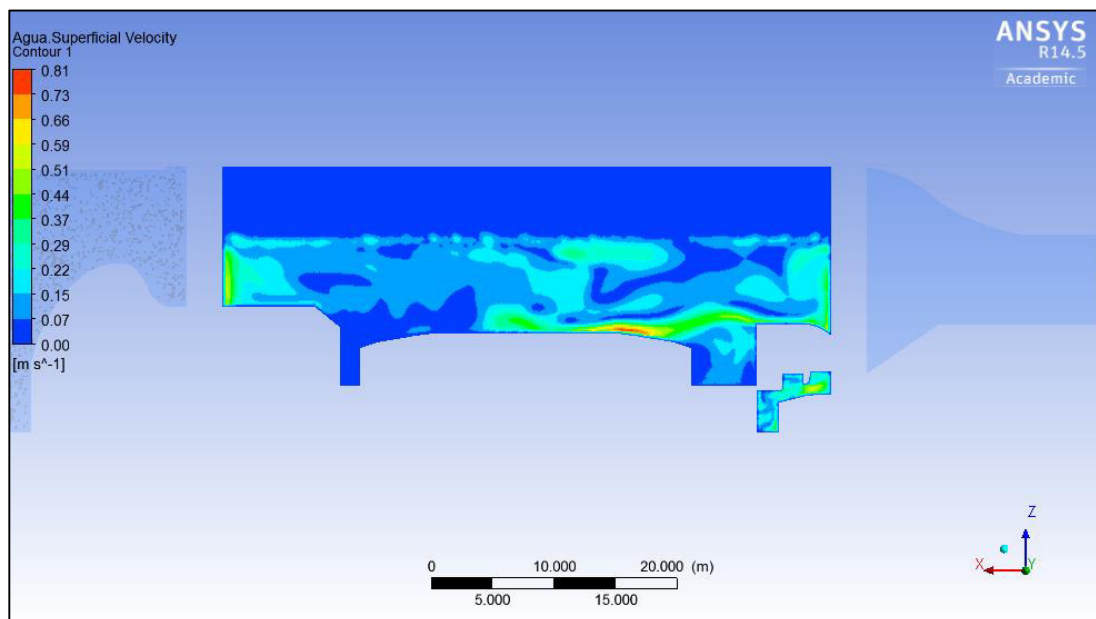


Figura 7.65: Contorno de velocidad en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

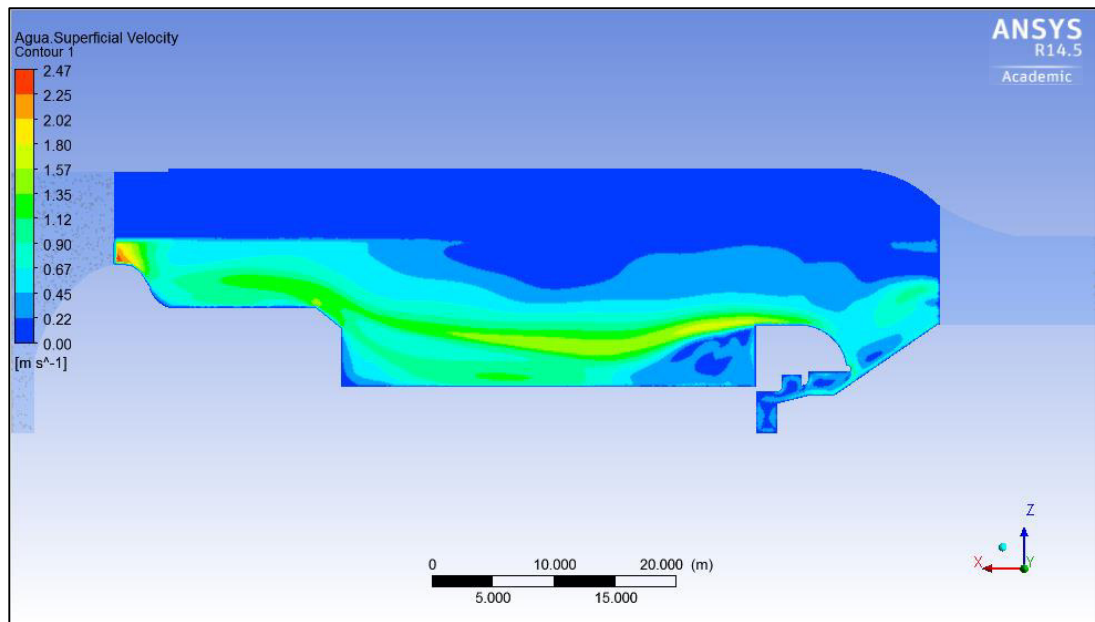
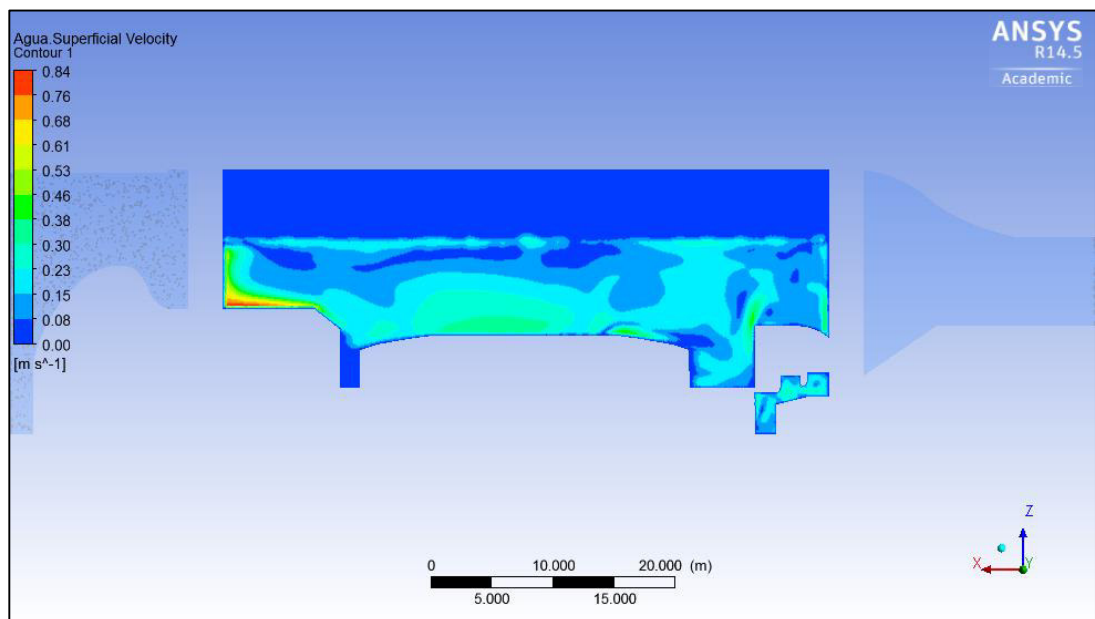


Figura 7.66: Contorno de velocidad en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal



- **Sección transversal**

Las figuras expuestas a continuación, muestran los contornos de velocidad en la sección transversal de las naves centrales y laterales del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las figuras se muestran dos secciones transversales, la primera que se encuentra a la izquierda de la figura representa a la sección transversal de nave lateral, mientras la que se encuentra a la derecha de la figura representa a la sección transversal de la nave central.

Como se puede apreciar, en la nave central el predominio de mayor magnitud de la velocidad se encuentra cercana a la parte inferior y al plano de simetría del desarenador, mientras que en las naves laterales los mayores valores de velocidad tienden a ir hacia la derecha de la sección transversal.

Además, si comparamos los contornos de velocidad de las naves centrales con las naves laterales, se puede determinar que hay una gran diferencia entre ellas, y estas son más notorias cada vez que se aumenta en caudal que ingresa al desarenador por el canal de acceso.

Figura 7.67: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

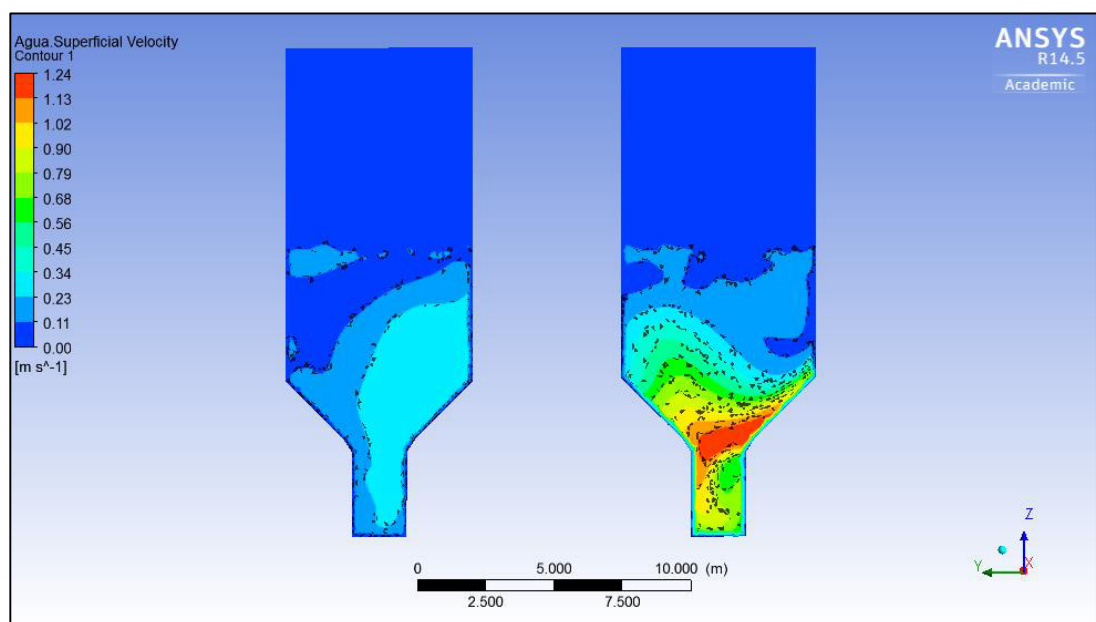


Figura 7.68: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

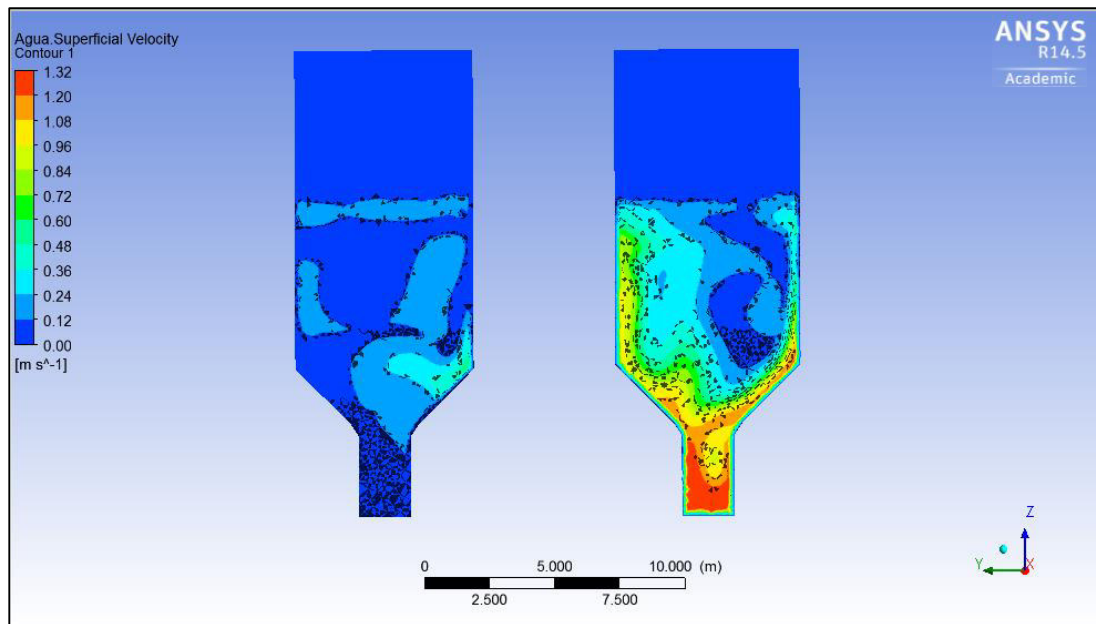
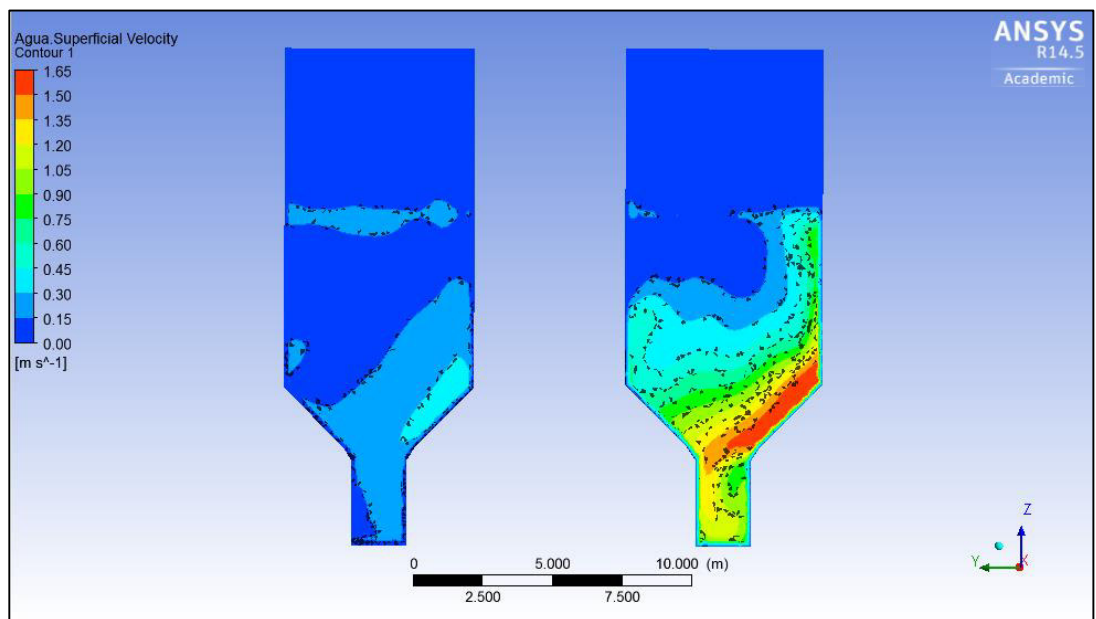


Figura 7.69: Contorno de velocidad del desarenador sin tabiquería, en la izquierda la nave lateral y en la derecha la nave central, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal



7.2. Concentraciones en secciones de interés

7.2.1. Desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería

La validación de los resultados de la Simulación de transporte de sedimentos de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato sin la tabiquería que existe actualmente se encuentra detalla en el Capítulo 6, donde se compara las concentraciones medias en la entrada y salida del desarenador, de la información de la concentración media en la bocatoma y Casa Fuerza, con los resultados de simulación de transporte de sedimentos, con la finalidad de obtener el tamaño de elemento para realizar la discretización del dominio de los diferentes escenarios a simular, esto quiere decir, para los caudales de 48 m³/s, 72 m³/s y 80 m³/s. Luego de realizar la validación de resultados, se obtuvo que el tamaño de elemento de 0,25 m, garantiza la buena discretización del dominio y presenta resultados aproximados con respecto a información medida in situ.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación de transporte de sedimentos, de concentración media en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los diferentes caudales propuestos en este trabajo.

Cuadro 7.3: Concentraciones medias en la sección transversal de entrada y salida del desarenador sin tabiquería para los diferentes caudales de ingreso

Desarenador sin tabiquería			
Caudal	Entrada	Salida	Retenido
(m ³ /s)	(gr/l)	(gr/l)	%
48	0,2054	0,1457	29,07
72	0,7017	0,6389	8,95
80	0,7502	0,6948	7,38

A partir del Cuadro 7.3, se puede determinar la eficiencia del desarenador en función de la concentración de sólidos en suspensión, para ello se ha determinado las concentraciones medias en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Para determinar la eficiencia del desarenador sin tabiquería se realizó la diferencia entre la concentración media de la entrada menos la de salida, obteniendo los siguientes porcentajes para los caudales

simulados. Para un caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, se tiene un 29,07% de los sólidos en suspensión que ingresan a la estructura del desarenador son retenidas en las naves centrales y laterales, mientras para un caudal de $72 \text{ m}^3/\text{s}$, esta retención de sólidos en suspensión es de 8,95% y para el caudal de $80 \text{ m}^3/\text{s}$, esta retención equivale a 7,38 % del material de suspensión que ingresa al desarenador.

En las siguientes figuras se presentan los resultados de la simulación de transporte de sedimentos del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, donde se puede visualizar las trayectorias de las partículas en suspensión en la estructura del desarenador sin tabiquería en diferentes proyecciones, como también los contornos de concentración de partículas en función del volumen fracción de partículas, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Trayectoria de partículas en suspensión

Las trayectorias de las partículas en suspensión nos permiten identificar su desplazamiento dentro de la estructura del desarenador, desde el canal de acceso hasta el vertedero. Para se ha realizado diferentes proyecciones de la estructura para visualizar el comportamiento de las partículas.

- **Vista en planta**

Observamos en las figuras de los diferentes caudales simulados que las partículas se distribuyen de forma uniforme en el canal de acceso al desarenador, mientras que en la transición, las partículas tienden a introducir en su mayoría a la nave central, mientras que la entrada a la nave lateral las pocas partículas desarrollan movimientos cíclicos, debido a las vórtices que sufre el flujo en esa zona.

A medida que el caudal aumenta en el canal de acceso al desarenador, las partículas en suspensión tienden ir hacia las naves centrales, este comportamiento de las partículas en suspensión esta relacionado directamente con el patrón de flujo del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

Figura 7.70: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta

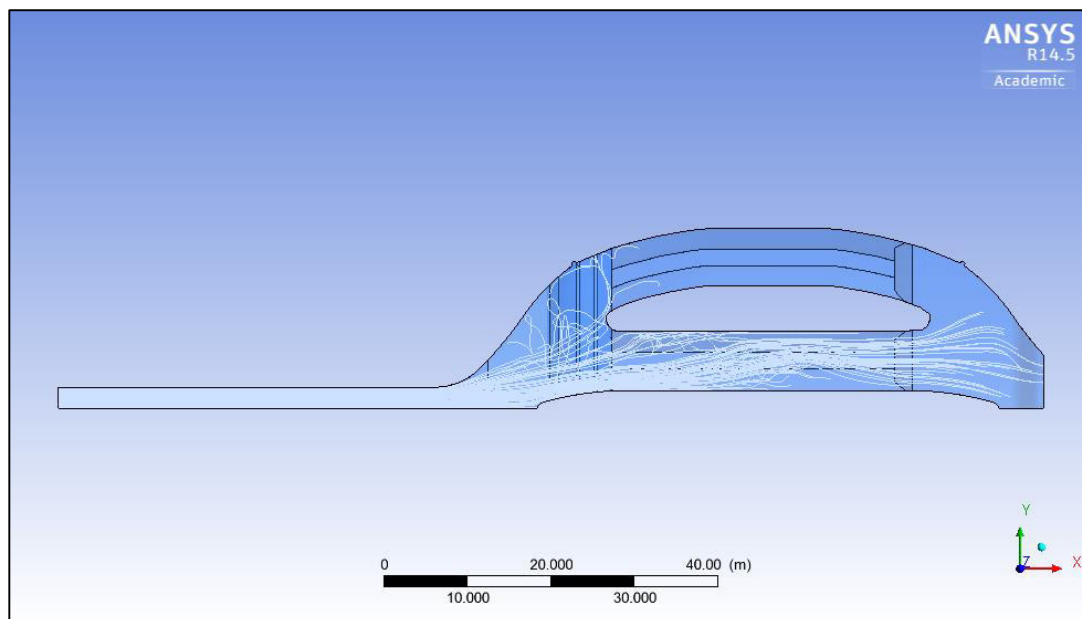


Figura 7.71: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta.

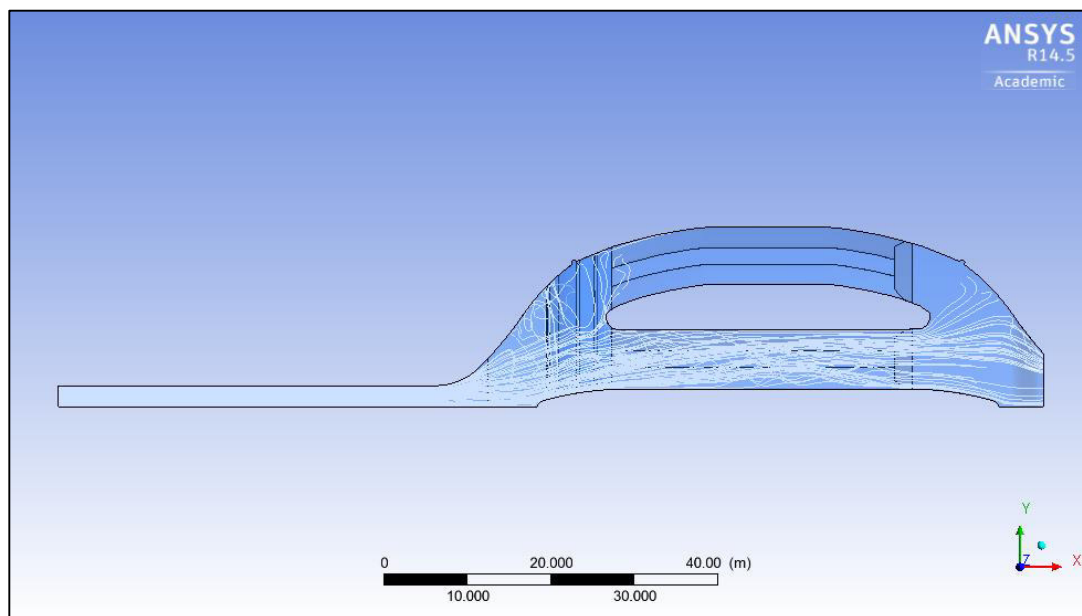
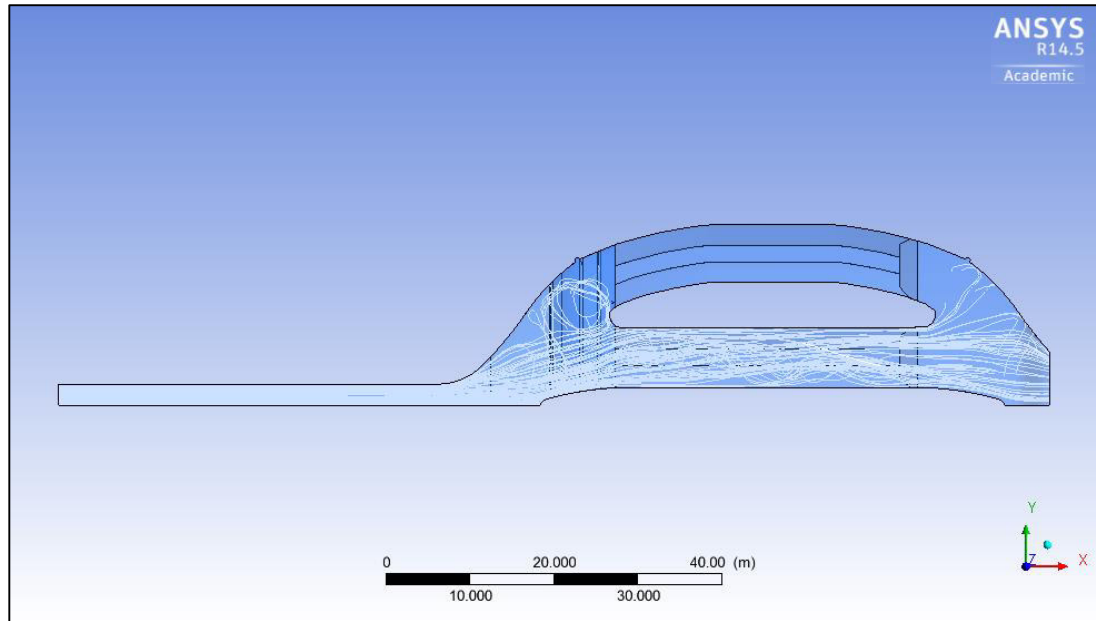


Figura 7.72: Transporte de sedimentos en el desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista en planta



- **Vista longitudinal**

En los tres caudales simulados, se observa que las partículas en suspensión se distribuyen de forma uniforme en el canal de acceso del desarenador sin tabiquería, mientras que las naves se puede apreciar que algunas trayectorias tienden ir hacia el fondo pero luego ascienden en dirección a la salida de las naves.

Figura 7.73: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

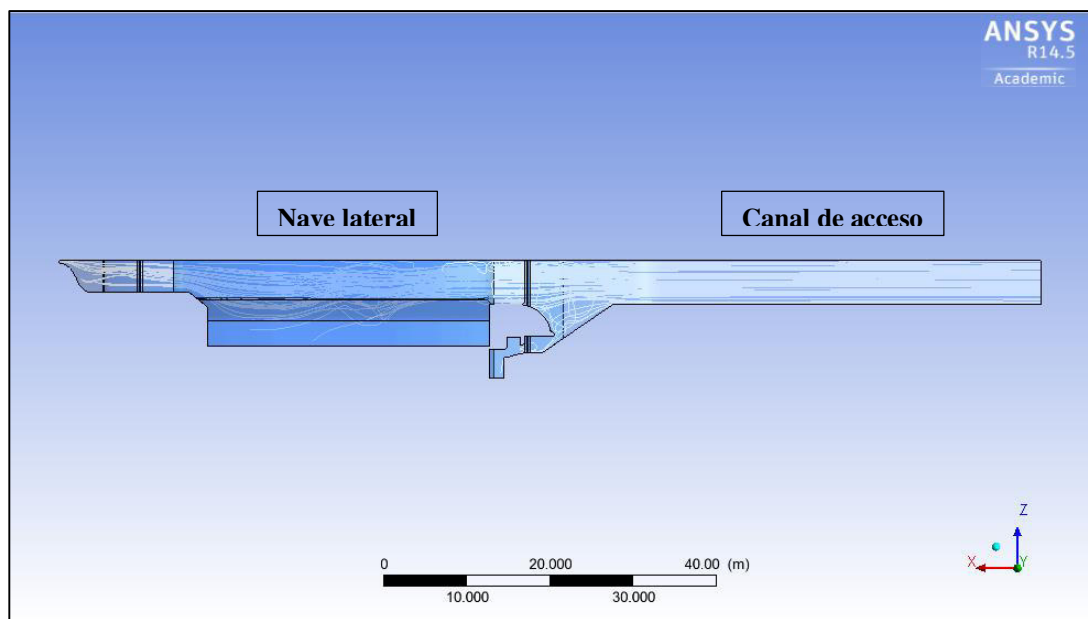


Figura 7.74: Transporte de sedimento en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

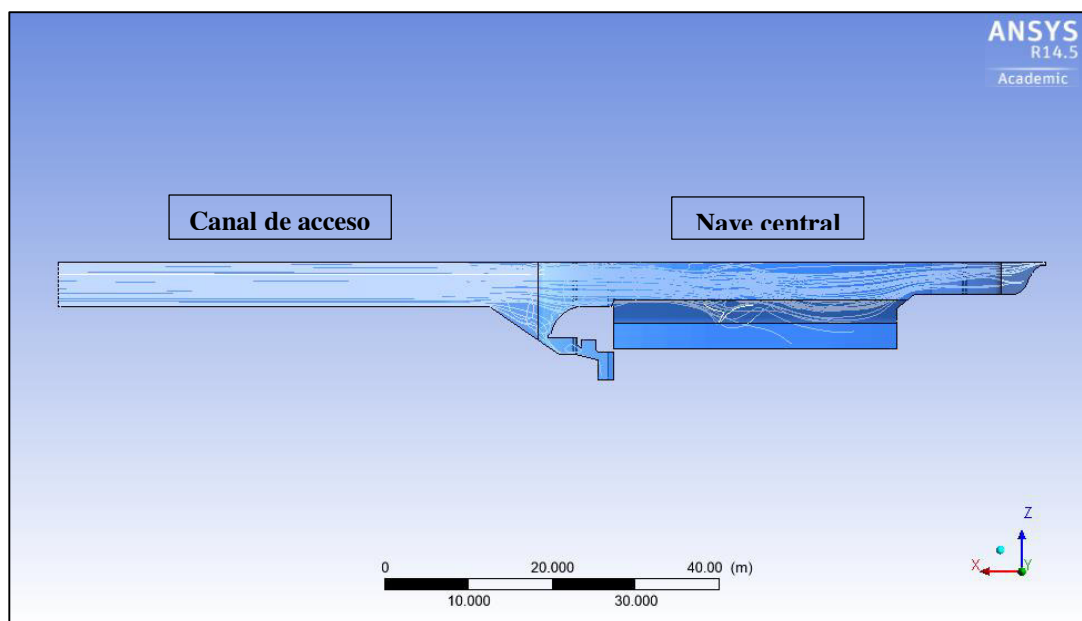


Figura 7.75: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

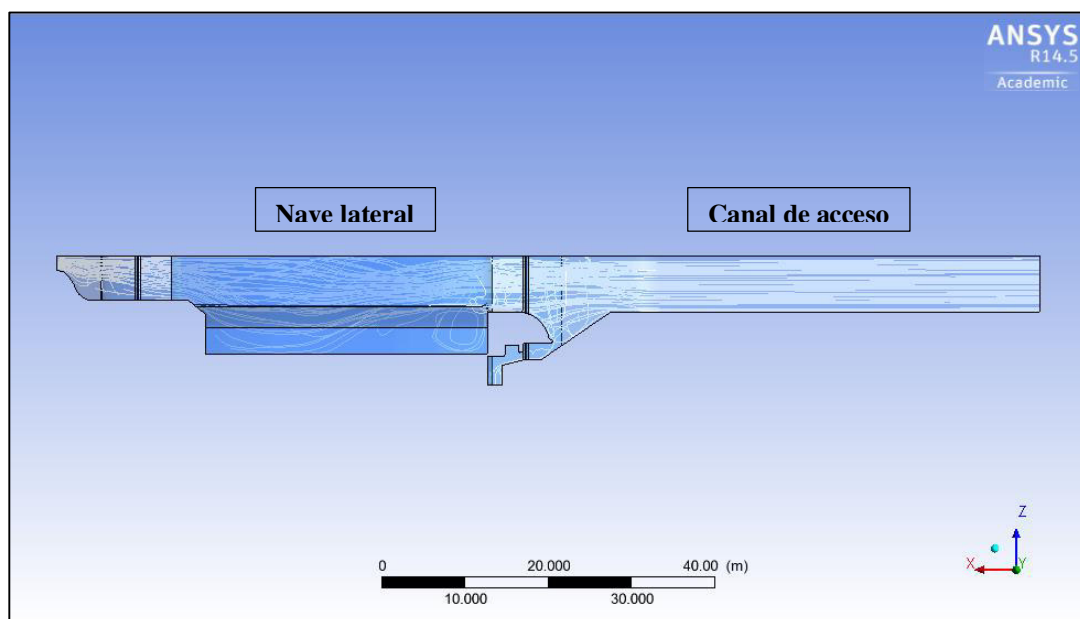


Figura 7.76: Transporte de sedimentos en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

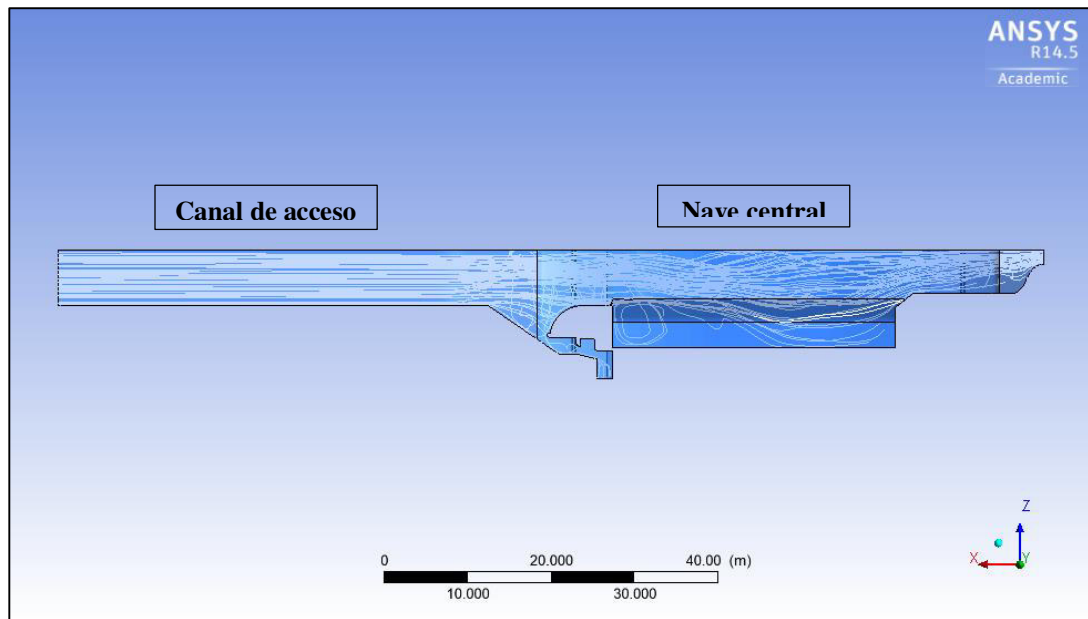


Figura 7.77: Transporte de sedimentos en la nave lateral del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal

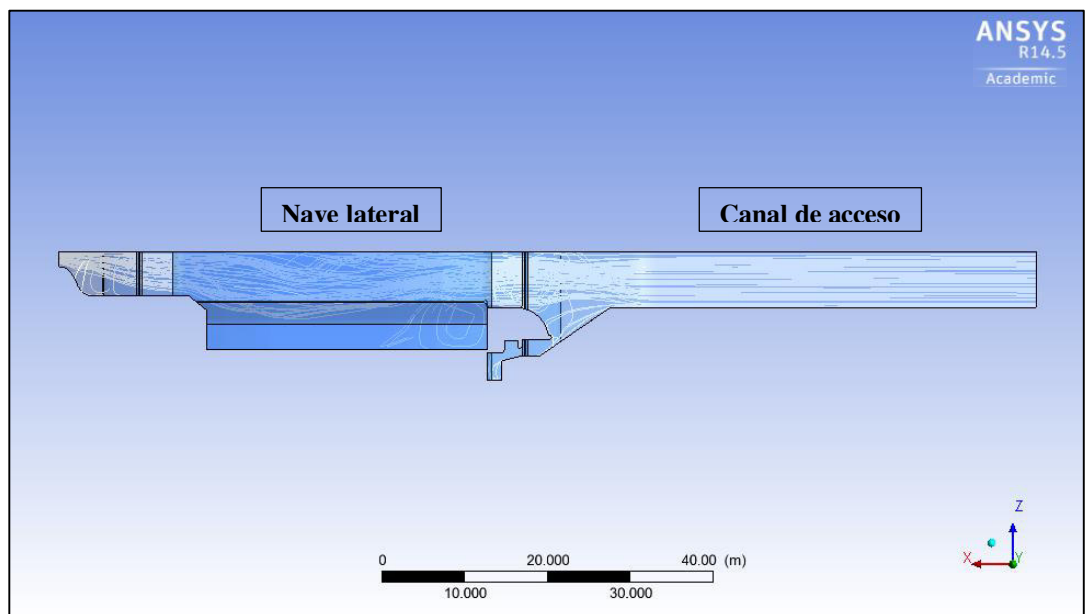
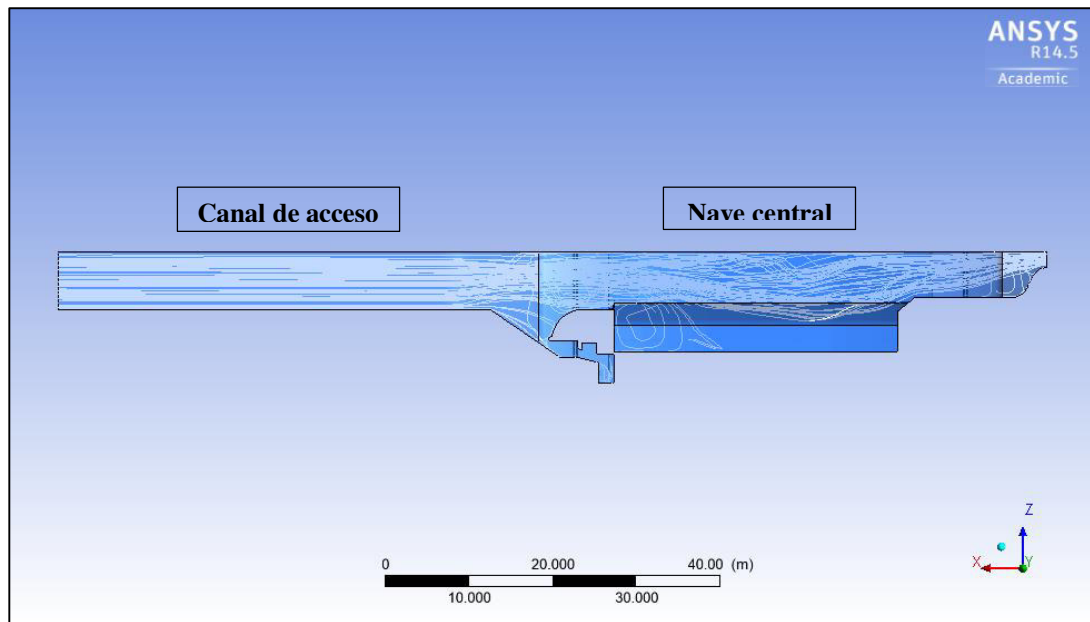


Figura 7.78: Transporte de sedimentos en la nave central del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista longitudinal



- **Secciones transversales**

En la figuras se detallan los contorno de concentración de sedimentos en suspensión en las secciones transversales en la entrada y salida del desarenador sin tabiquería de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, para los caudales de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la entrada del desarenador, podemos observar que los sedimentos en suspensión se encuentran distribuidos de forma uniforme en la sección, mientras que en la salida del desarenador sin tabiquería, para el caudal de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ la concentración de sedimentos en suspensión que pasan las naves del desarenador se encuentran el parte central de la salida, pero para los caudales de $72 \text{ m}^3/\text{s}$ y $80 \text{ m}^3/\text{s}$ esta distribución de sedimentos en suspensión tienen la tendencia desde el centro de la salida hasta llegar a las paredes, a medida que aumenta el caudal de ingreso en el canal de acceso al desarenador sin tabiquería.

Figura 7.79: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48$ m^3/s – Sección transversal

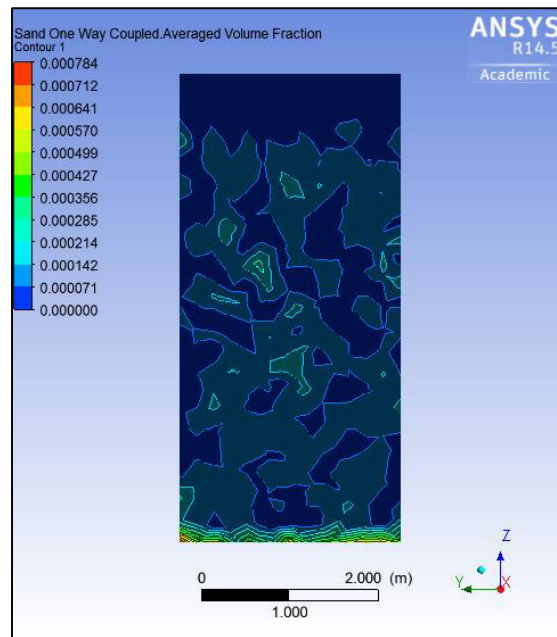


Figura 7.80: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 48$ m^3/s – Sección transversal

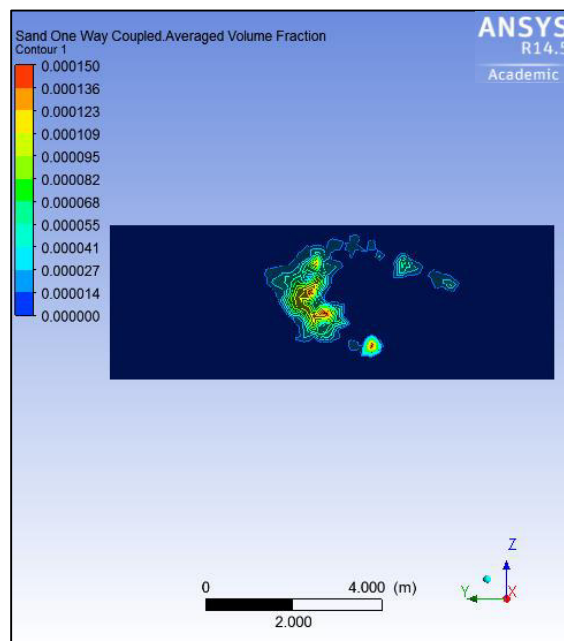


Figura 7.81: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

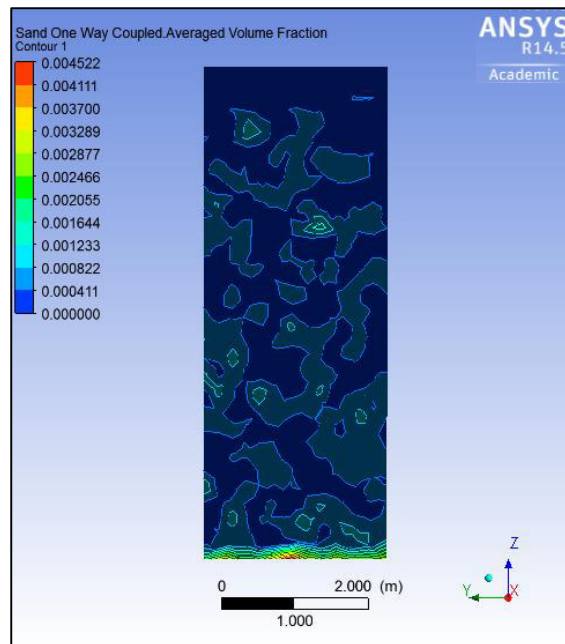


Figura 7.82: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 72$ m^3/s – Sección transversal

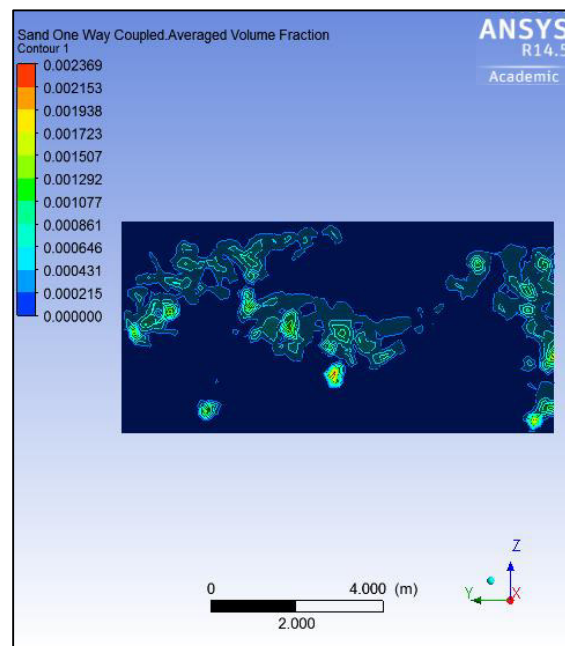


Figura 7.83: Concentración de sedimentos en la entrada del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal

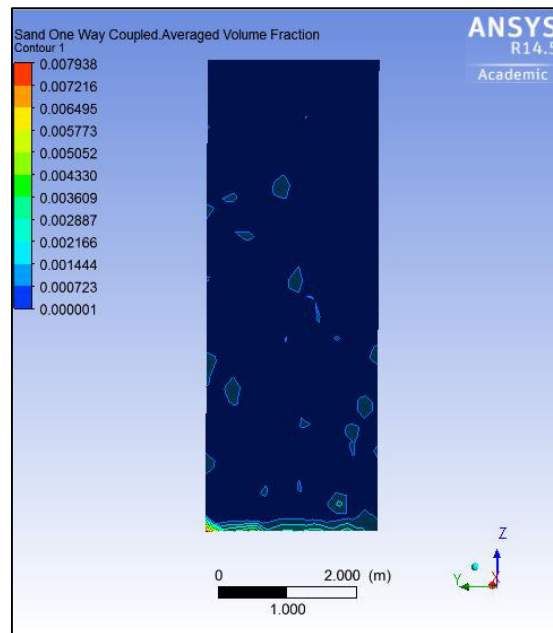
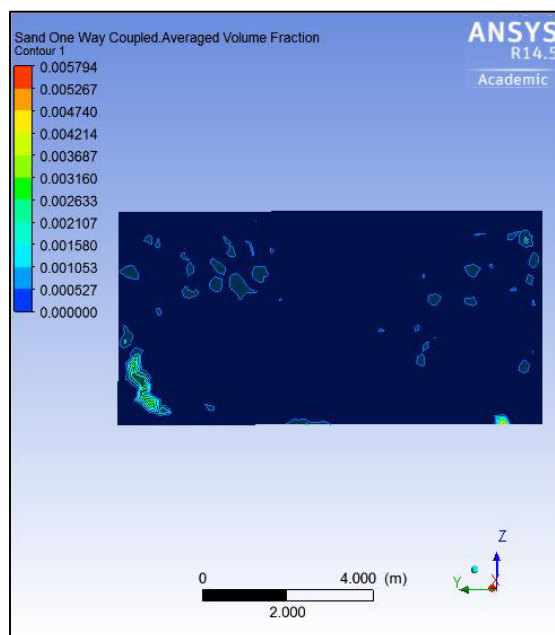


Figura 7.84: Concentración de sedimentos en la salida del desarenador sin tabiquería, para $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sección transversal



8. CONCLUSIONES

- Se ha realizado la simulación numérica con el software Ansys CFX del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato con la tabiquería que existe actualmente en las naves centrales y laterales (Escenario 1) y sin el sistema de tabiquería en las naves (Escenario 2) como propuesta de mejora, utilizando información de estudios anteriores e información registrada por la empresa administradora de la central hidroeléctrica.
- Se ha realizado la simulación hidrodinámica con el software Ansys CFX del Escenario 1. Se determinó que las velocidades medias en la entrada y salida de las naves centrales son mayores que en las naves laterales, debido a la geometría que presenta el desarenador de la central hidroeléctrica.
- Se ha realizado la simulación hidrodinámica con el software Ansys CFX del Escenario 2, de la propuesta de mejorar del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato. Se determinó que las velocidades medias en la entrada y salida de las naves centrales son mayores que en las naves laterales. Además, a medida que se aumenta el caudal de ingreso al desarenador las naves centrales adquieren mayor velocidad, mientras que las naves laterales presentan una mínima variación en las velocidades de entrada y salida, esto se debe al incremento de la sección de entrada de las naves debido a que la tabiquería ocupa $11,46 \text{ m}^2$ en cada nave, por lo que la masa de agua que ingresa al desarenador por el canal de acceso genera un flujo uniforme que se desarrolla en el eje longitudinal, el mismo eje que comparten las naves centrales.
- Comparando los resultados de velocidad media en la entrada y salida de las naves centrales y laterales de la simulación hidrodinámica del Escenario 1 y Escenario 2, se determinó que las velocidades medias en la entrada y salida de la nave central del Escenario 2 son ligeramente mayores a las del Escenario 1, por lo que se concluye que el Escenario 2 no presentaría una mejora al proceso de sedimentación de sólidos en suspensión de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.
- Se ha realizado la simulación de transporte de sedimentos del desarenador sin tabiquería en las naves centrales y laterales de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, a partir de los resultados obtenidos se ha terminado la eficiencia del desarenador para la propuesta de mejora, en función de la concentración media en la entrada y salida de la estructura del desarenador. Para un caudal ingreso al desarenador de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, se tiene un 29,07% de sólidos en suspensión que son retenidas por la naves centrales y laterales, mientras para un caudal de $72 \text{ m}^3/\text{s}$, esta retención de sólidos en suspensión es de 8,95% y para el

caudal de $80 \text{ m}^3/\text{s}$, la retención equivale a 7.38% del material de suspensión que ingresa al desarenador.

9. RECOMENDACIONES

Se propone algunas mejoras para investigaciones futuras relacionadas al proceso de sedimentación del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

- Debido a que el desarenador existente tiene un caudal de diseño de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ y en la actualidad la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato requiere más caudal para la generación eléctrica, se recomienda el diseño y construcción de un nuevo desarenador para que pueda cumplir con la capacidad de caudal captado actualmente por la central hidroeléctrica.
- Realizar, organizar y ejecutar campañas de mediciones de velocidad de corrientes y concentración de sólidos en suspensión en el sistema bocatoma – desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, con la necesidad de tener información necesaria para validar los resultados de la simulación hidrodinámica y de transporte de sedimentos.
- Se debe considerar en la geometría del desarenador para la simulación hidrodinámica y de transporte de sedimentos, los orificios de 0,30 m de longitud por 0,10 m de altura que se encuentran en los bordes de las alas de los diedros que conforman las tabiquerías en las naves centrales y laterales, estos orificios dejan escurrir los sedimentos, con la finalidad de que los elementos tabicados limitan la altura de caída libre de las partículas sólidas en suspensión a un máximo de 1,25 m.
- En las simulaciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos del desarenador se debe considerar la funcionalidad del sistema de purga continua de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, que se encuentra conformada por 40 válvulas de purga en la central y 42 válvulas de purga en la nave lateral.
- Con la implementación de lo expuesto anteriormente, sobre la geometría de las naves desarenadoras que existen actualmente en la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, se debe utilizar una computadora con la suficiente capacidad para procesar los cálculos que origina el solucionador del software, debido al costo computacional que originan los elementos del dominio discretizado.
- Se debe realizar una comparación de resultados de la simulación numérica, con un modelo físico del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, con el fin de observar y cuantificar el proceso de sedimentación en las naves tabicadas para caudales mayores al diseñado.

10.BIBLIOGRAFIA

ANSYS, Inc. (2013). *“ANSYS CFX – Solver Modeling Guide”*. Canonsburg, Estados Unidos.

ANSYS, Inc. (2013). *“ANSYS CFX – Solver Theory Guide”*. Canonsburg, Estados Unidos.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2010). *“Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico”*. Lima, Perú.

CARRILLO, J. y CASTILLO, L. (2013). *“Análisis del flujo turbulento y bifásico en un aliviadero de presa mediante simulación numérica tridimensional”*. Murcia, España.

CARRIÓN, R. (2004). *“Análisis de los efectos del Fenómeno del Niño en el año 1998 en la presa Los Ejidos”*. Piura, Perú.

CASTRO, I. y VELÁSQUEZ, T. (2007). *“Alternativas de diseño del sistema de regulación horario del reservorio San Diego para el afianzamiento de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato”*. Lima, Perú.

CEDIT. (2014). *“Análisis y comparación de los fenómenos de sedimentación del desarenador de una minicentral mediante la simulación en Ansys CFX y un modelo físico”*. Lima, Perú.

CHACÓN, G. (2002). *“Estudio hidrobiológico de la cuenca superior del río Santa, Ancash – Perú”*. Lima, Perú.

CHIOCK, F. y VELÁSQUEZ, T. (2007). *“Análisis de los flujos subsuperficial a través de las cimentaciones de las estructuras de regulación ubicadas en San Diego – Central Hidroeléctrica Cañón del Pato”*. Lima, Perú.

CORONADO, F. (2004). *“El desarenador”*. Lima, Perú.

CORONADO, F. (2004). *“Manual de diseño de estructuras hidráulicas”*. Lima, Perú.

DIAZ, O. (1991). *“Optimización de las obras de captación y desarenación de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato con incidencia en la recuperación de la potencia de la central”*. Lima, Perú.

DUKE ENERGY EGENOR. (2005). *“Costos variables por sólidos en suspensión”*. Ancash, Perú.

DUKE ENERGY EGENOR. (2005). *“Estudio hidrológico de los ríos Santa y Chancay: Centrales Hidroeléctricas de Cañón de Pato y Carhuaquero”*. Lima, Perú.

ELECTROPERU S.A. (1985). *“Estudio de transporte de sedimentos, Sistema Bocatoma – Desarenador – Turbinas, Central Hidroeléctrica Cañón del Pato”* Auspicios de la Gerencia de Operaciones de HIDRANDINA S.A., la Sub – Gerencia de Estudios Especiales – Unidad de Proyectos Río Santa de ELECTROPERU S.A. y la Dirección de la Investigación de la Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú.

FERNÁNDEZ, J. (2012). *“Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos, Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos”*. Barcelona, España.

GARCÍA, M. y MAZA, J. (2008). *“Origen y propiedades de los sedimentos. Capítulo 7 del Manual de ingeniería de Ríos”*. Ciudad de México, México.

GÓMEZ, J. (1932). *“Saltos de agua y presas de embalse”*. Madrid, España.

JALIL, F. (2010). *“Modelamiento de flujo de pulpas de cobre en cajones de distribución”*. Santiago, Chile.

JUÁREZ, E. y RICO, A. (2005). *“Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos”*. Ciudad de México, México.

LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA. (1974). *“Estudio de modelo hidráulico de la bocatoma de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato”*. Lima, Perú.

LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA y MINISTERIO DE AGRICULTURA. (1967), *“Estudio de modelo hidráulico del desarenador de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato”*. Lima, Perú.

LÓPEZ, B. (2015). *“Aplicación de CFD Ansys – Fluent en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura”*. Toluca, México.

LUZURIAGA, M. y AMAYA, D. (2014). “*Simulación numérica del flujo de sedimentos en el desarenador del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair*”. Cuenca, Ecuador.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, (2005). “*Diagnóstico de calidad de agua en la cuenca del río Santa*”. Lima” Perú.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. (2005). “*Diagnóstico de calidad de agua en la cuenca del río Santa*”. Lima, Perú.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. (2009). “*Perú sector eléctrico 2009 – documento promotor*”. Lima, Perú.

MONTESINOS, F. (1997). “*El mundo científico: Santiago Antúnez de Mayolo*”. Lima, Perú.

MORERA, S. (2010). “*Dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del Río Santa*”. Lima, Perú.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. (2005). “*Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*”. Lima, Perú.

PROAÑO, P. (2013). “*Bases para el diseño hidráulico de las estructuras de entrada, cámara de desarenación y estructuras de limpieza, con caudales entre 2 m³/s a 20 m³/s para desarenadores en aprovechamiento hidroeléctricos*”. Quito, Ecuador.

QUINTERO, K. (2009). “*Metodología de diseño de obras hidráulicas en estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*”. Medellín, Colombia.

ROCHA, A y LESCANO, M. (1969). “*Transporte de sedimentos*”. Lima, Perú.

SAMANIEGO, S. (2015). “*Simulación numérica del funcionamiento hidráulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD*”. Loja, Ecuador.

SPARROW, E. (2008). “*El desarenador*”. Chimbote, Perú.

VALLES, L. (2014). “*¿Quién fue Santiago Antúnez de Mayolo?*”. Lima, Perú.

VALDIVIA, V. (1996). “*Equipo para determinar la orientación del flujo de un fluido*”. Lima, Perú.

VEGAS, F y VELÁSQUEZ, T. (2007). *“Represamiento a nivel de prefactibilidad de las lagunas Shallap y Rajucolta para afianzar la generación de energía y potencia de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato”*. Lima, Perú.

VEN TE CHOW. (1994). *“Hidráulica de canales abiertos”*. Ciudad de México, México.

VILLANUEVA, R. (2011). *“Características de la cuenca del río Santa”*. Folleto informativo N° 1. Huaraz, Perú.

VILLÓN, M. (2005). *“Diseño de Estructuras Hidráulicas”*. Segunda Edición. Lima, Perú.

ANEXOS

ANEXO 1: Planteamiento del diseño hidráulico del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

1.1 Datos

Para realizar el diseño hidráulico del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, se tomaron en cuenta los datos del sistema Bocatoma – Desarenador, que se fueron medidos para realizar diferentes estudios que se realizaron para la mejora de la central hidroeléctrica, además de bibliografía calificada acerca del diseño hidráulico de desarenadores como también apuntes del curso de Centrales Hidroeléctricas dictada en la escuela de Ingeniería Mecánica de Fluidos. A continuación, se explicará y se detallará la procedencia de cada uno de los datos que se tomaron en cuenta para realizar el diseño hidráulico.

- **Túnel de aducción**

El dato que tomamos en cuenta es el ancho del túnel de aducción, debido a que es necesario para el diseño hidráulico de transición de entrada.

$$b_{\text{túnel}} = 6,00 \text{ m}$$

- **Caudal de ingreso**

Es uno de los datos más importantes para poder realizar el diseño hidráulico del desarenador, el caudal considerado es el que permite generar la mayor potencia de la central hidroeléctrica, esta es igual a 265,565 Mw.

$$Q_{\text{entrada}} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Elementos dentro del desarenador**

Estos datos fueron considerados en el estudio que realizó ELECTROPERU sobre el transporte de sedimentos en el sistema Bocatoma – Desarenador – Turbina.

- **Agua**

- Densidad

$$\rho_w = 1\,000\text{ Kg/m}^3$$

- Viscosidad cinemática

$$\vartheta_w = 1,12 \times 10^{-6}$$

- Temperatura

$$T_w = 15^{\circ}\text{C}$$

- **Sedimento**

- Densidad

$$\rho_s = 2\,650\text{ Kg/m}^3$$

- **Diámetro máximo de partícula a sedimentar**

El diámetro máximo de partícula es un dato indispensable para poder realizar el diseño hidráulico de los desarenadores, debido a que el objetivo principal del diseño de desarenadores, es decantar el diámetro máximo de partículas que pueda ingresar dentro de las cámaras desarenadoras y no dejar pasar diámetros mayores a esta.

En el Capítulo IV, se encuentran diferentes criterios para determinar el diámetro máximo de partículas a decantar dentro de los desarenadores que son diseñados para propósitos hidroenergéticos. Por ejemplo, en la Tabla 4.1 el diámetro de partícula a seleccionar está en función de la altura de caída del aprovechamiento hidroenergético, de las cuales en la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato tiene una caída igual a 398 m, entonces corresponde un diámetro de partícula de 0,3 mm. Mientras que en la Tabla 4.2, está en función del tipo de turbina que se utiliza para la generación de energía, la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato utiliza turbinas pelton de eje horizontal, con este criterio se debe seleccionar un diámetro de partícula a decantar en el rango de 0,2 mm a 0,4 mm.

En el estudio de transporte de sedimentos realizados por ELECTROPERU llegaron a diferentes conclusiones acerca del tamaño de partículas que un desarenador puede detener, estas fueron:

- *Son las arenas muy finas las que tienen la más alta concentración. Este hecho es importante resaltarlo pues las arenas finas son las que existen en mayor proporción entre los sólidos que un desarenador puede sedimentar y por lo tanto hallar el modo de lograr la decantación de estas partículas muy finas significa a su vez reducir la concentración a la salida del desarenador.*
- *El material limoso es mayor que la suma de las arenas y tiene la más alta concentración de sólidos en suspensión en la Bocatoma. En la actualidad es imposible a través de medios mecánicos, eliminar el material limoso con un desarenador.*
- *Por cierto que para la fracción de limo y arcilla las concentraciones son mayores, pero es poco lo que puede hacerse al respecto si tenemos en cuenta que estos materiales no pueden ser decantados por ningún desarenador convencional. Entonces, decantar y evacuar las arenas finas y muy finas del desarenador significa evitar el paso de altas concentraciones a las turbinas.*

Dentro de los libros de diseño hidráulico de desarenadores para centrales hidroeléctricas también podemos encontrar indicaciones de algunos autores acerca del diámetro máximo a decantar y sobre la velocidad del agua en las cámaras desarenadoras, como el autor Gómez J. donde detalla en su libro “Saltos de aguas y presas de embalse”, lo siguiente:

Según Du Buat, las velocidades límites por debajo de las cuales el agua cesa de arrastrar diversas materias son: para las arcillas plásticas, 0,081 metros por segundo; para la arena fina, 0,16 metros por segundo, y para la arena gruesa, 0,216 metros por segundo. La separación de las partículas limosas diluidas en agua, solo se consigue en depósitos en que el agua duerma bastantes horas, a veces más de 24; y aunque convendría separar dichas materias, no causan éstas tanto daño como la arena, que desde luego hay que hacer sedimentar por completo.

Teniendo en cuentas estas conclusiones e indicaciones, el diámetro máximo de partícula a sedimentar para el diseño hidráulico del desarenador se encuentra en el rango de las arenas finas, como se observa en la Tabla 5.2, el diámetro es el siguiente:

$$d = 0,1 \text{ mm}$$

El diámetro seleccionado no quiere decir que ningún tamaño de partículas pase por el desarenador, lo que se trata es hacer un diseño hidráulico que minimice la gran cantidad partículas de suspensión que pasa por el desarenador, pero teniendo en cuenta las capacidades de estas estructuras a la hora de decantar partículas en suspensión; a continuación, se presenta una conclusión del estudio elaborado por ELECTROPERÚ en 1985 sobre las limitaciones de los desarenadores en función de los efectos que pueden originar el paso de partículas por estas estructuras:

El desgaste de las turbinas no será del todo suprimido, pues el paso de los limos escapa de la acción de cualquier tipo de desarenador que sea, pero el efecto de estos materiales quedará en límites aceptables, permitiendo así una explotación normal para este género de instalaciones.

- **Número de cámaras desarenadoras**

El número de cámaras desarenadoras a utilizar para el cálculo del diseño hidráulico es igual a 5, debido al gran caudal que utiliza la central hidroeléctrica para la generación, esto permite repartir el caudal entre las cámaras desarenadoras y poder realizar un buen dimensionamiento.

$$N = 5 \text{ cámaras desarenadoras}$$

- **Altura de las cámaras desarenadoras**

Debido a que la altura actual del desarenador tabicado de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato es 16 m aproximadamente. Entonces, la nueva altura de las cámaras desarenadoras para el diseño hidráulico a considerar es de 10 m, esta altura está compuesta de otras estructuras que se explicaran después en el desarrollo del diseño hidráulico del desarenador.

$$h = 10 \text{ m}$$

- **Caudal de purga**

El caudal de purga a considerar en el diseño hidráulico está en función de un porcentaje del caudal de ingreso al desarenador, tomando en cuenta lo enunciado por Gómez en su publicación “*Salto de agua y presas de embalse*” en 1932: *El agua que se gasta en la purga puede ser el décimo del caudal total, y esta pérdida no tiene importancia en épocas de altas aguas, que es cuando más caudal sólido arrastra.*

En este diseño hidráulico se considera un 10% del caudal de ingreso.

$$\%_{\text{purga}} = 10 \%$$

1.2 Diseño hidráulico de las cámaras desarenadoras

- **Velocidad horizontal de sedimentación**

Para el cálculo de la velocidad horizontal de sedimentación utilizamos la Ecuación 4.3.

$$V_d = a\sqrt{d}$$

La constante “a” se determina con la Tabla 4.4 teniendo en cuenta el diámetro de la partícula, para este diseño hidráulico el diámetro de la partícula es 0,1 mm, entonces obtenemos:

Según Camp

$$V_d = 0,44\sqrt{0,1}$$

$$V_d = 0,1391 \text{ m/s}$$

Según R. S. Varshney

$$V_d = 0,66\sqrt{0,1}$$

$$V_d = 0,2087 \text{ m/s}$$

La velocidad escogida para el diseño hidráulico del desarenador es:

$$V_d = 0,14 \text{ m/s}$$

- **Velocidad de caída de la partícula**

La velocidad de sedimentación está determinada para diferentes autores, estas son:

- Arkhangelski

La velocidad de sedimentación se determina en función de diámetro de la partícula según la Tabla 4.5.

$$w = 0,692 \text{ cm/s}$$

$$w = 0,0069 \text{ m/s}$$

- Owens

La velocidad de sedimentación se calcula con la ecuación 4.4, en donde el término k se determina con la Tabla 4.6 en función de la forma de los granos.

$$w = k\sqrt{d(\rho_s - 1)}$$

$$w = 1,28\sqrt{0,0001(2,65 - 1)}$$

$$w = 0,0164 \text{ m/s}$$

- Sudry

La velocidad de sedimentación se determina con la Gráfica 4.1 en función del diámetro de la partícula.

$$w = 1 \text{ cm/s}$$

$$w = 0,01 \text{ m/s}$$

- Scotti – Floglieni

La velocidad de sedimentación se calcula con la Ecuación 4.5

$$w = 3,8\sqrt{d} + 8,3d$$

$$w = 3,8\sqrt{0,0001} + 8,3(0,0001)$$

$$w = 0,0388 \text{ m/s}$$

- Sellerio

La velocidad de sedimentación se determina con la Gráfica 4.2 en función del diámetro de la partícula.

$$w = 1 \text{ cm/s}$$

$$w = 0,01 \text{ m/s}$$

- Krey

Para determinar la velocidad de sedimentación utilizamos la Ecuación 4.6, debido que diámetro de la partícula es menor a 2 mm.

$$d(\rho_s - 1) = 0,007w^{1,2}$$

$$0,0001(2,65 - 1) = 0,007w^{1,2}$$

$$w = 0,1629 \text{ m/s}$$

- Bosterli

La velocidad de sedimentación se calcula con la Ecuación 4.8.

$$w = 10\sqrt{d}$$

$$w = 10\sqrt{0,0001}$$

$$w = 0,1 \text{ m/s}$$

A continuación, presentamos un cuadro resumen de las velocidades de sedimentación según los diferentes autores.

Tabla N° 1.1. Velocidad de sedimentación determinada por diferentes métodos.

Métodos	w (m/s)
Arkhangelski	0,0069
Owens	0,0164
Sudry	0,0100
Scotti - Floglieni	0,0388
Sellerio	0,0100
Krey	0,1629
Bosterli	0,1000

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de sedimentación escogida para el diseño hidráulico es de 0,01 m/s, debido a que se repite en dos oportunidades y además se encuentra muy cerca de promedio de las velocidades de sedimentación, descartando los métodos de Krey y Bosterli que se encuentran muy lejos del valor promedio de velocidades.

$$w = 0,01 \text{ m/s}$$

Ahora calculamos el tiempo de sedimentación con la Ecuación 4.13

$$t_s = \frac{h}{w}$$

$$t_s = \frac{10}{0,01}$$

$$t_s = 1\,000 \text{ s}$$

- **Caudal de diseño en cada cámara desarenadora**

Para determinar el caudal de diseño para cada cámara desarenadora es necesario considerar el caudal que se va utilizar para el proceso de evacuación de los sólidos que se van a decantar en el desarenador, para el diseño hidráulico hemos considerado un caudal de purga del 10% del caudal de entrada al desarenado, con esta consideración y con la Ecuación 4.9 determinamos el caudal de diseño para cada cámara desarenadora.

$$Q_{dc} = \frac{Q_{\text{entrada}}}{N} \times (1 + \% \text{Purga})$$

$$Q_{dc} = \frac{80}{5} \times (1 + 0,10)$$

$$Q_{dc} = 17,60 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Dimensionamiento de las cámaras desarenadoras**

Para ellos utilizaremos las ecuaciones pero despreciando el efecto del flujo turbulento sobre la velocidad de sedimentación.

- Ancho de la cámara desarenadora

Utilizamos la Ecuación 4.11

$$b = \frac{Q_{dc}}{hV_d}$$

$$b = \frac{17,60}{10 \times 0,14}$$

$$b = 12,57 \text{ m}$$

- Longitud de la cámara desarenadora

Utilizamos la Ecuación 4.18

$$L = \frac{hV_d}{w}$$

$$L = \frac{10 \times 0,14}{0,01}$$

$$L = 140 \text{ m}$$

Ahora consideramos los efectos retardatorios de la turbulencia. Para eso determinamos la reducción de la velocidad por efectos de la turbulencia w' , a partir de los siguientes autores.

- Velikanov, Bestelli

Utilizamos la Ecuación 4.22

$$w' = \frac{0,132V_d}{\sqrt{h}}$$

$$w' = \frac{0,132 \times 0,14}{\sqrt{10}}$$

$$w' = 0,0058 \text{ m/s}$$

- Eguiazaroff

Utilizamos la Ecuación 4.23

$$w' = \frac{V_d}{5,7 - 2,3h}$$

$$w' = \frac{0,14}{5,7 - 2,3 \times 10}$$

$$w' = -0,0080 \text{ m/s}$$

- Sokolov

Utilizamos la Ecuación 4.24

$$w' = 0,152w$$

$$w' = 0,152 \times 0,01$$

$$w' = 0,0015 \text{ m/s}$$

- Gubin

Utilizamos la Ecuación 4.25

$$w' = \frac{V_d}{6,6h^{0,77}}$$

$$w' = \frac{0,14}{6,6 \times 10^{0,77}}$$

$$w' = 0,0036 \text{ m/s}$$

A continuación, se presenta un cuadro resumen de la reducción de la velocidad por los efectos turbulentos.

Tabla N° 1.2. Determinación de la reducción de la velocidad debido a efectos turbulentos por diferentes métodos

Métodos	w' (m/s)
Velikanov, Bestelli	0,0058
Eguiazaroff	-0,0080
Sokolov	0,0015
Gubin	0,036

Fuente: Elaboración propia.

La reducción de velocidad debido a los efectos turbulentos que se va a escoger para el diseño hidráulico del desarenador es igual a 0,001 m/s, debido a que solo se van a considerar los valores positivos, en este caso descartaríamos el método de Eguiazaroff, además el valor escogido se aproxima mucho al valor determinado por Sokolov.

$$w' = 0,001 \text{ m/s}$$

Calculamos el tiempo de sedimentación considerando los efectos de la turbulencia.

$$t_s = \frac{h}{w - w'}$$

$$t_s = \frac{10}{0,01 - 0,001}$$

$$t_s = 1\,111,11 \text{ s}$$

- Longitud de la cámara desarenadora

Utilizamos la Ecuación 4.26 para determinar la nueva longitud de la cámara desarenadora considerando los efectos de la turbulencia y el coeficiente k para desarenadores de baja velocidad, como es el caso de este diseño hidráulico, este valor lo podemos determinar con la Tabla 4.7

$$L_c = k \frac{hV_d}{w - w'}$$

$$L_c = 1,25 \times \frac{10 \times 0,14}{0,01 - 0,001}$$

$$L_c = 194,44 \text{ m}$$

Obteniendo las nuevas dimensiones de la cámara desarenadora considerando los efectos de la turbulencia sobre la velocidad de sedimentación tenemos que evaluar si se cumple el criterio de volúmenes.

- Volumen de agua, utilizamos la Ecuación 4.27

$$V_{\text{agua}} = Q \times t_s$$

$$V_{\text{agua}} = 17,60 \times 111,11$$

$$V_{\text{agua}} = 1955,53 \text{ m}^3$$

- Volumen geométrico, utilizamos la Ecuación 4.28

$$V_g = L \times B \times h$$

$$V_g = 194,44 \times 12,57 \times 10$$

$$V_g = 24441,10 \text{ m}^3$$

Observamos que se cumple el criterio de volúmenes con la Ecuación 4.29

$$V_g \geq V_{\text{agua}}$$

$$24441,10 \text{ m}^3 \geq 1955,53 \text{ m}^3$$

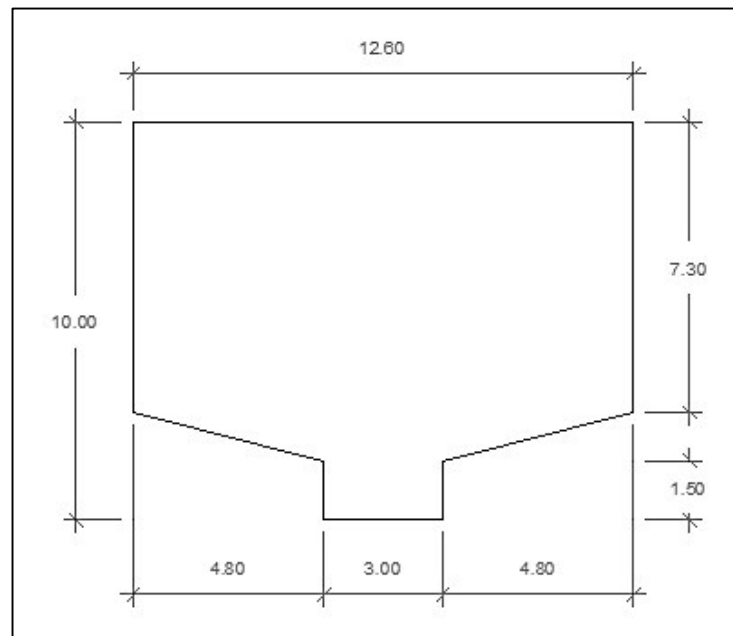
Ahora definimos las dimensiones de las cámaras de desarenación, para ellos debemos tomar en cuenta el fondo de las cámaras para que estas permitan el proceso de sedimentación y evacuación de los sólidos en suspensión, para ello nos hemos guiado de parámetros de diseño descrito por Gómez J. en su publicación “*Saltos de agua y presas de embalse*” en 1932, que dice lo siguiente.

El fondo de los depósitos de sedimentación debe tener la inclinación más fuerte posible hacia el extremo de aguas abajo, y se debe aspirar a dar una pendiente longitudinal de 1:20 y una transversal de 1:4 a 1:7.

Para el diseño hidráulico del fondo de los depósitos de sedimentación se considera una pendiente transversal de 1:4.

Tomando en cuenta los parámetros de diseño, las dimensiones transversales de la zona de decantación de la cámara es: ancho neto de 12,60 m, una parte vertical superior de 7,30 m, una parte trapezoidal inferior de 1,20 m y una parte rectangular ubicada en la parte baja de 3 m de base por 1,50 m de altura.

Figura N° 1.1. Sección transversal de la cámara desarenadora.



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el volumen geométrico de las cámaras necesitamos el área de la sección transversal y la longitud.

La sección transversal de la cámara desarenadora tiene un área de 105,84 m, mientras que la longitud de la cámara tendrá un aumento de 194,44 m, que fue determinado anteriormente, a 200 m para cumplir el criterio de volúmenes.

Se procede a calcular el volumen geométrico de la cámara desarenadora multiplicando el área de la sección transversal y la longitud.

$$V_g = A_s \times L$$

$$V_g = 105,84 \times 200$$

$$V_g = 21\,168 \text{ m}^2$$

Ahora volvemos a comprobar el criterio de volúmenes con las nuevas dimensiones de la cámara desarenadora, para ello utilizamos nuevamente la Ecuación 4.29.

$$V_g \geq V_{\text{agua}}$$

$$21\,168,00\text{ m}^3 \geq 19\,555,53\text{ m}^3$$

Observamos que nuevamente se cumple el criterio de volúmenes.

- **Ancho total de la estructura de desarenación**

Para determinar el ancho total solo debemos de multiplicar el ancho neto por el número de cámaras desarenadoras más los espacios que dejan cada una de estas.

$$B_t = 5 \times 12,6 + (5 - 1) \times 1,0$$

$$B_t = T_1 = 67,00\text{ m}$$

1.3 Diseño hidráulico de la estructura de entrada

- **Transición recta**

Los datos necesarios para el cálculo de la transición recta son: el ancho del canal de aducción y el ancho total de la estructura de desarenación, para ello utilizamos la Ecuación 4.2.

Además, tenemos que tener en cuenta que según el Bureau of Reclamation para conseguir pérdidas de carga mínima el valor de α puede ser $12,5^\circ$ y puede ser aumentado hasta 25° , para el cálculo de la transición recta utilizamos el valor de 25° .

$$L = \frac{T_1 - T_2}{2 \tan \alpha}$$

$$L = \frac{66,20 - 6,00}{2 \tan 25^\circ}$$

$$L = 65,4074\text{ m} \approx 66\text{ m}$$

1.4 Diseño hidráulico de las estructuras de limpieza

Para el diseño hidráulico de las estructuras de limpieza no basta con realizar cálculos analíticos o utilizar algunas de las fórmulas que se explican en los capítulos anteriores, debido que el desarenador es diseñado para una gran cantidad de caudal y la operación de evacuación de los sólidos decantados debe ser de forma continua para que no afecte la generación de energía eléctrica. Por lo cual existe un tipo de desarenador con esas características, descrito por Gómez J. en su publicación de “*Salto de agua y presas de embalses*”, que dice lo siguiente:

Desarenador de purga continua del material sólido eliminado, sistema Dufour. Es la más eficaz de todos los sistemas conocidos, y su aplicación se ha extendido mucho.

Además, el sistema de purga del tipo de desarenador mencionado anteriormente fue considerado en el estudio que realizó ELECTROPERU sobre el transporte de sedimentos en el sistema Bocatoma – Desarenador – Turbina en el que concluyó lo siguiente:

El sistema de purga del nuevo desarenador deberá ser de arrastre continuo y solo funcionará en el periodo de avenidas, entre Diciembre – Abril, o cuando exista una gran avenida en cualquier momento del año. H. DUFOUR ha diseñado unas aberturas de lavado continuo denominado “elementos bieri”, de pequeño radio de acción, repartidas a lo largo del desarenador, y ha dado a la sección transversal una forma tal que la arena al sedimentarse se desliza por las superficies del lecho de las naves.

A partir de la esta conclusión, en el estudio antes mencionado se recalcó dos recomendaciones acerca de sistema de purga, estas son:

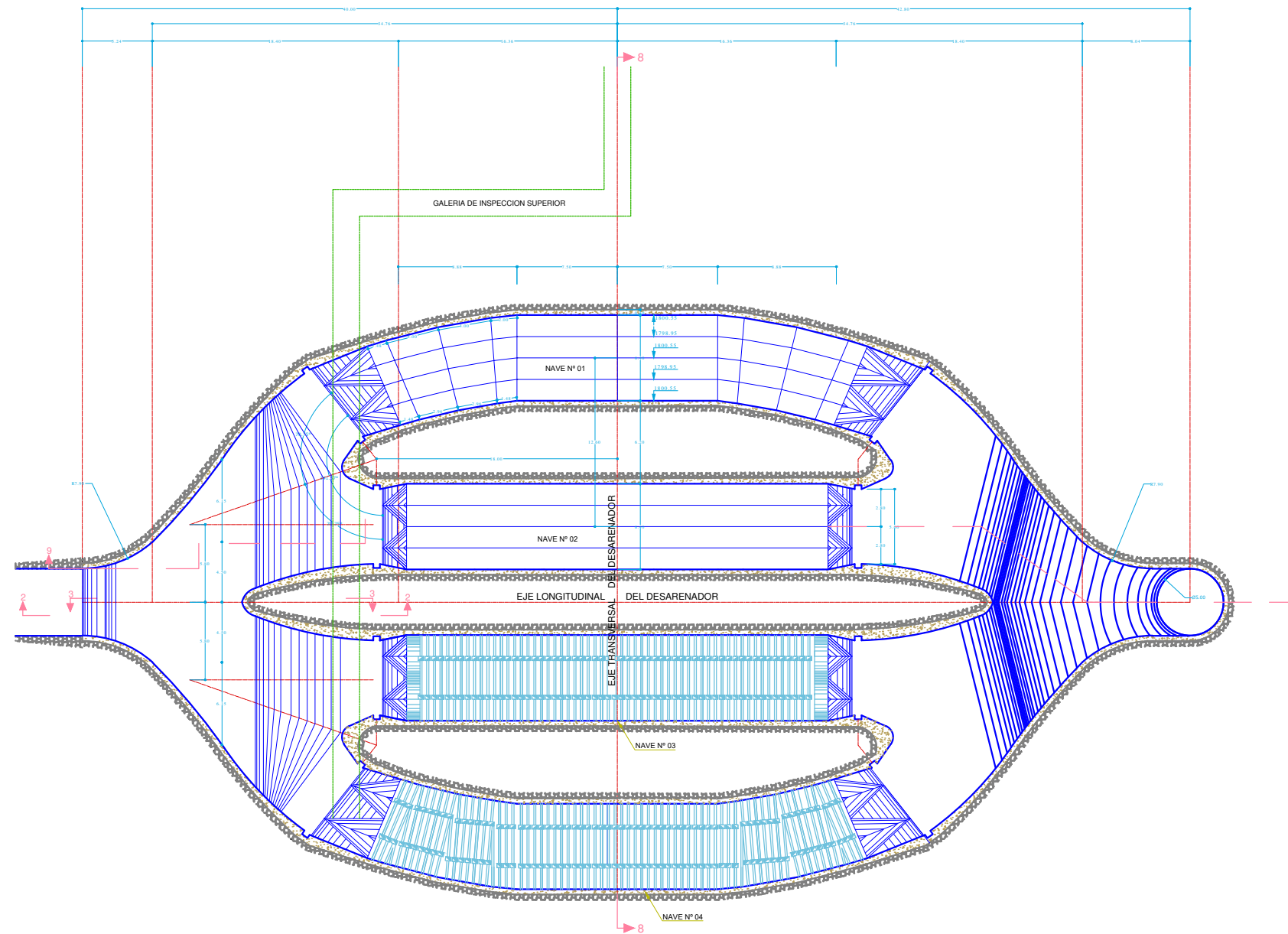
El actual sistema de purga debe ser modificado. Con este propósito es necesario efectuar un estudio de modelo reducido del sistema de purga, de esta manera se sabrá con certeza la dimensión que debe tener cada uno de los orificios de purga y las distancias que deben guardar entre sí. La decantación de los sólidos no es uniforme en el lecho del desarenador y por tanto los orificios de purga deben estar en relación al volumen del material decantado y no necesariamente debe tener la misma dimensión.

El sistema de purga modificado, operará sólo en grandes avenidas del material en suspensión. En el periodo de estiaje no será necesario su funcionamiento, pues el volumen

del transporte de sólidos en suspensión es bajo; además, de esta manera se evitará destinar un determinado caudal de agua al sistema.

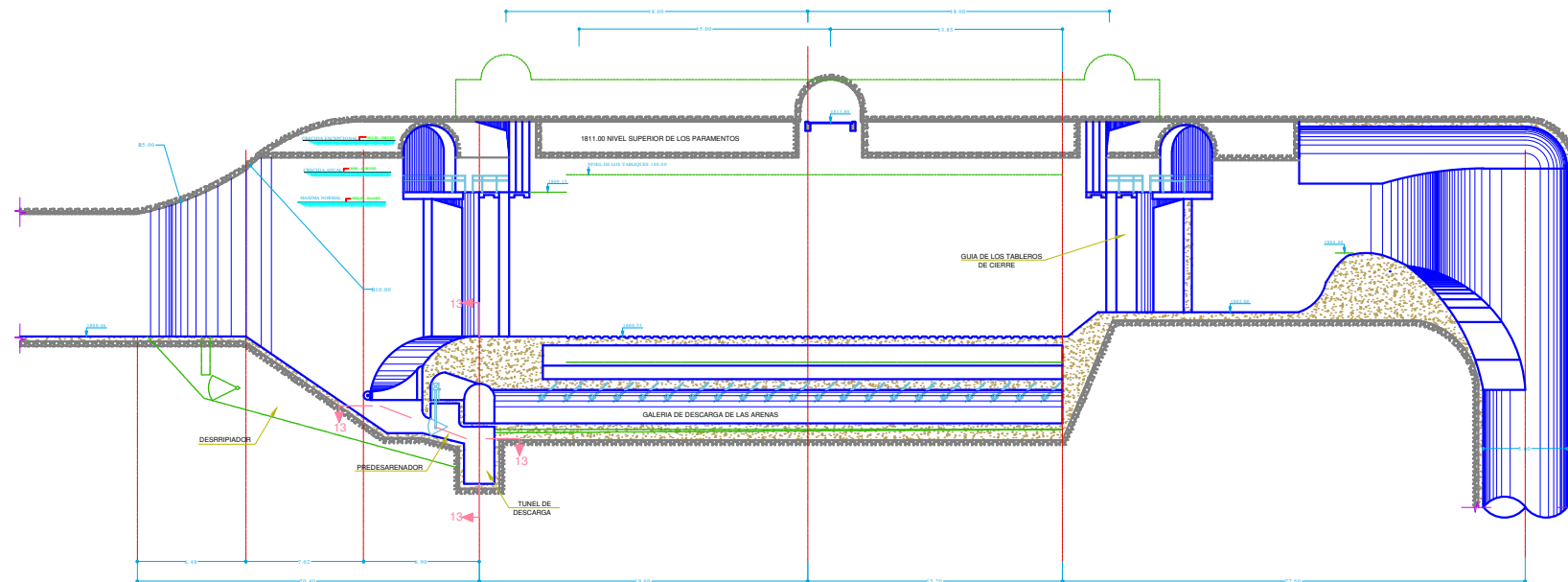
ANEXO 2: Planos del desarenador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato

- Plano N°07 – I: Desarenador con tabiquería en las naves centrales y laterales – Vista en planta.
- Plano N°07 – II: Corte longitudinal del desarenador con tabiquería y corte transversal en las naves centrales y laterales.
- Plano N°10 – I: Ubicación y detalle de elementos tabicados en las naves centrales y laterales del desarenador.
- Plano N°10 – II: Corte típico de las naves tabicadas y corte de un elemento tabicado.

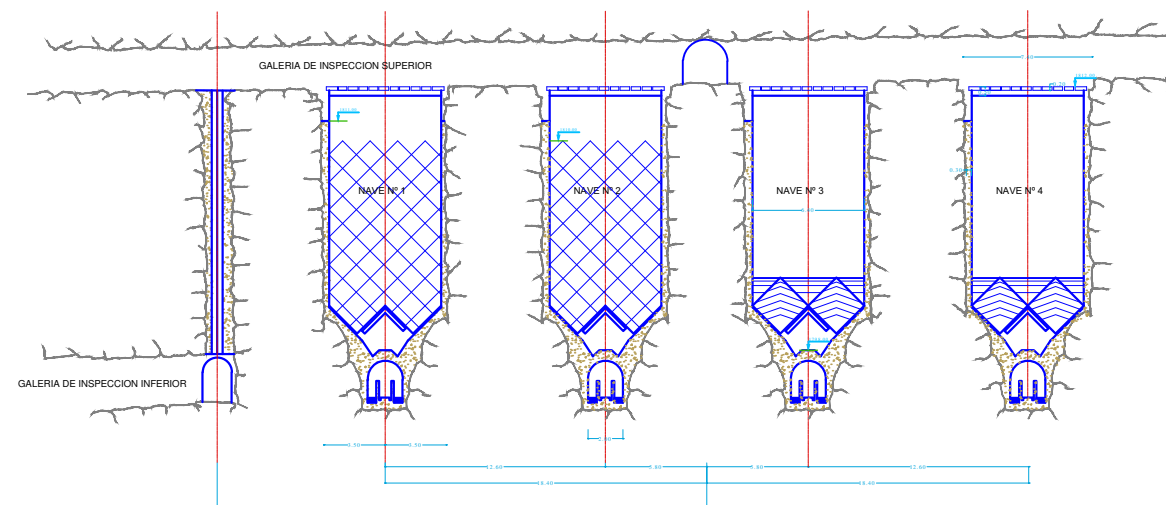


VISTA DE PLANTA
ESCALA: 1/200

DUKE ENERGY EGENOR EN C. POR A. CENTRAL HIDROELECTRICA DEL CAÑON DEL PATO		
PROYECTO: DESARENADOR ENCOFRADO DESABLEUR BETON		
PLANO:	SI	
UBICACION: DEPTO: ANCASH PROV: HUAYLAS DIST: HUALLANCA	PLANO Nº 07-I	
DISEÑO: DEPARTAMENTO TECNICO DE LA C.P.S.	ESCALA: 1/200	FECHA: 22 - NOV.- 1979
REVISADO: ING. ANTONIO GAGO	DIBUJO: JAIME CABANA G.	

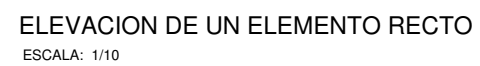


CORTE TRANSVERSAL 9 - 9
 ESCALA: 1/200

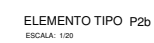
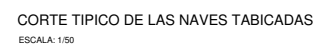


CORTE TRANSVERSAL 8 - 8
 ESCALA: 1/200

DUKE ENERGY EGENOR EN C. POR A. CENTRAL HIDROELECTRICA DEL CAÑON DEL PATO		
PROYECTO: DESARENADOR ENCOFRADO DESABLEUR BETON		
PLANO:	SI	
UBICACION: DEPTO: ANCASH PROV: HUAYLAS DIST: HUALLANCA	PLANO N° 07-II	
DISEÑO: DEPARTAMENTO TECNICO DE LA C.P.S.	ESCALA: 1/200	FECHA: 22 - NOV.- 1979
REVISADO: ING. ANTONIO GAGO	DIBUJO: JAIME CABANA G.	



DUKE ENERGY EGENOR EN C. POR A. CENTRAL HIDROELECTRICA DEL CAÑON DEL PATO		
PROYECTO: DESARENADOR ENCOFRADO DESABLEUR BETON		
PLANO:	NAVES TABICADAS	SI
UBICACION: DEPTO: ANCASH PROV: HUAYLAS DIST: HUALLANCA		PLANO N° 10-I
DISEÑO: DEPARTAMENTO TECNICO DE LA C.P.S.	ESCALA: INDICADA	
REVISADO: ING. ANTONIO GAGO	DIBUJO: JAIME CABANA G.	FECHA: 22 - NOV. - 1979



DUKE ENERGY EGENOR EN C. POR A. CENTRAL HIDROELECTRICA DEL CAÑON DEL PATO		
PROYECTO: DESARENADOR ENCOFRADO DESABLEUR BETON		
PLANO:	NAVES TABICADAS	SI
UBICACION: DEPTO: ANCASH PROV: HUAYLAS DIST: HUALLANCA		PLANO N°:
DISEÑO: DEPARTAMENTO TECNICO DE LA C.P.S.		ESCALA: INDICADA
REVISADO: ING. ANTONIO GAGO	DIBUJO: JAIME CABANA G.	FECHA: 22 - NOV. - 1979